

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody
Transmission Characteristic Shaping of Power LED Diode

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Stratil**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody
Transmission Characteristic Shaping of Power LED Diode

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rešerši vlastností současných výkonových LED diod
2. Nastudujte vlastnosti optických prvků vhodných ke tvarování vyzařovací charakteristiky výkonových LED diod.
3. Prostudujte možnosti použití reflektorů, koncentrátorů a čoček ke tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody.
4. Jednotlivé návrhy nasimulujte v programu LightTools a porovnejte výsledky simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] CHAVES, Julio. Introduction to Nonimaging Optics. Boca Raton, USA: CRC Press, 2008. ISBN 978-1-4200-5429-3
- [2] WINSTON, Roland; MINANO, Juan, C.; BENITEZ, Pablo. Nonimaging optics. London: Elsevier, 2005. ISBN 0-12-759751-4
- [3] Manuály k programu LightTools

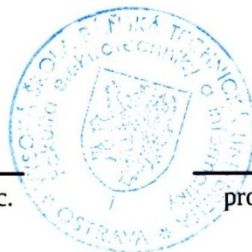
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Vitásek**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2013


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Vitáskovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Teoretická část pojednává o vlastnostech výkonových LED a jejich současném stavu na trhu. Vysvětluje jejich princip, využití a základní vlastnosti. Dále pojednává o optických prvcích, jako jsou čočky, jejich vlastnosti a jejich rozdělení. Pojednává o využití optických koncentrátorů a reflektorů v optických aplikacích, jejich vlastnosti a základní rozdělení. Praktická část je zaměřena na tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED pomocí optického reflektoru a optické čočky. Měření směrové charakteristiky v laboratoři a v programu LightTools. Jsou uvedeny grafy rozložení výkonu získané z měření v laboratoři a z simulací v programu LightTools. Veškeré změřené závěry jsou uvedeny v tabulkách a grafech a porovnány.

Klíčová slova

Achromatická optická čočka, FWHM, geometrická optika, LED, LightTools, optická čočka, Optické vlákno, optický koncentrátor, optický reflektor, optika, rozložení výkonu,

Abstract

The theoretical part deals with the properties of the power LED and the current situation on the market. It explains the principle, use and basic properties. It also shows the optical elements, such as lenses, their properties and their distribution. It discusses the use of optical concentrators and reflectors in optical applications, their characteristics and basic division. The practical part is focused on shaping the radiation characteristics of the power LED using optical reflector and optical lens. Measurement of radiation pattern in the laboratory and in the LIGHTTOOLS. They are shown the power distribution graphs obtained from laboratory measurements and simulation in LIGHTTOOLS. All measured conclusions are presented in tables and graphs and compared.

Key words

Achromatic lenses, FWHM, geometrical optics, LED, LIGHTTOOLS, optical lenses, optical fiber, optical concentrator, optical reflector, optics, power distribution,

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
FWHM	Full Width at Half Maximum	Plná Šířka v Polovině Maxima
LED	Light Emitting Diode	Dioda emitující světlo
InGaN	indium gallium nitride	nitrid galia a india
Al₂O₃	aluminium oxide	oxid hlinitý
SiC	silicon carbide	karbid křemíku
Si	silicium	křemík
F	focus	ohnisko

Obsah

1	Úvod	1
2	Rešerše současných vlastností výkonových LED diod	2
2.1	Princip LED technologie	2
2.2	Využití LED	2
2.3	Výkonové LED.....	2
2.4	Konstrukční uspořádání.....	3
2.5	Parametry výkonových LED	4
2.5.1	Vyzařovací úhel.....	4
2.5.2	CRI = Color Rendering Index	4
2.5.3	Svítivost - intenzita světelného záření	5
2.5.4	Blikání - přerušovaný režim činnosti.....	5
2.5.5	Teplota chromatičnosti - barevná teplota	5
2.5.6	Napájení.....	5
2.5.7	Světelná účinnost.....	6
2.5.8	Účinnost.....	6
2.5.9	Teplotní závislost.....	6
2.5.10	Životnost.....	6
2.6	Vytváření bílého světla u bílých výkonových LED	6
2.6.1	Použití více barevných LED.....	7
2.6.2	Použití luminoforů.....	7
2.7	Využití výkonových LED.....	7
3	Vlastnosti optických prvků vhodných ke tvarování vyzařovací charakteristiky výkonových LED diod	8
3.1	Optické čočky a jejich vlastnosti.....	8
3.2	Základní druhy optických čoček	9
3.2.1	Spojná čočka.....	10
3.2.2	Rozptylná čočka	10

3.2.3	Fresnelova čočka	11
3.2.4	Kuličková čočka	12
3.3	Optické vady čoček	13
3.3.1	Barevná vada	13
3.4	Optické reflektory (koncentrátory).....	13
3.5	Základní druhy optických reflektorů (koncentrátorů)	13
3.5.1	Půlkulatý koncentrátor (hemispherical).....	14
3.5.2	Složený parabolický koncentrátor (CPC)	14
3.5.3	Dielektricky plně vnitřně odražející koncentrátor (DTIRC).....	15
4	Měření v laboratoři.....	16
4.1	Výkonová LED LXHL-LW6C.....	16
4.2	Parabolický reflektor CLP20CR.....	17
4.3	Achromatická čočka AC254-030-A-ML.....	17
4.4	Směrová vyzařovací charakteristika výkonové LED diody	18
4.5	Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru	20
4.6	Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu s reflektorem	21
4.7	Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu s reflektorem a optickou čočkou	23
5	Simulace v programu LightTools.....	25
5.1	Struktura LightTools	25
5.1.1	Core module	25
5.1.2	Illumination module	25
5.1.3	Optimization module	25
5.1.4	Advanced Physics Module	26
5.2	Prostředí programu LightTools	26
5.3	Modelování reflektoru CLP20CR	28
5.4	Směrová vyzařovací charakteristika výkonové LED diody pomocí simulace v programu LightTools.....	29

5.5	Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru pomocí simulace v programu LightTools.....	31
5.6	Měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem pomocí simulace v programu LightTools.....	34
5.7	Měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem a čočkou pomocí simulace v programu LightTools	36
6	Srovnání výsledků z měření a simulací.....	38
6.1	Výsledky z laboratorního měření	38
6.2	Výsledky ze simulací programu LightTools	40
6.3	Srovnání výsledků z měření a simulací	42
7	Závěr.....	46
	Použitá literatura	47

1 Úvod

Jako bakalářskou práci jsem si vybral tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED, kdy mým úkolem bylo vytvarovat světelný kužel tak, aby bylo možno světlo navázat do plastového optického vlákna o průměru jádra 8 mm. Měření jsem prováděl v laboratoři a také v programu LightTools.

Jako první se moje bakalářská práce zabývá technologií LED, jejím principem a použitím. Poté se dále zabývá vlastnostmi výkonových LED, které jsou rozděleny do menších podkapitol a nakonec jejich využitím.

Další kapitola mé bakalářské práce se zabývá optickými prvky pro tvarování vyzařovací charakteristiky. Jako první jsou čočky, kde popisují jejich vlastnosti a poté různé druhy optických čoček rozdělené do podkapitol. Nakonec jsem se zmínil o vadách optických čoček. Dalším optickým prvkem, který jsem zahrnul do teorie mé bakalářské práce je reflektor, nebo také koncentrátor. Uvedl jsem jejich využití a v podkapitolách jsem zmínil základní druhy koncentrátorů a reflektorů.

Další část je věnována již praktickému měření v laboratoři. Jako první jsem popsal, co bylo použito pro měření a dále v podkapitolách jsem popisoval postup laboratorního měření a zobrazil grafické výsledky z měření.

Předposlední část je věnována simulaci v programu LightTools. Nejprve jsem popsal strukturu programu a poté jsem se věnoval seznámení pracovního prostředí programu. V další podkapitole jsem ukázal, jak jsem modeloval reflektor v programu LightTools a jako další podkapitoly následují již popisy daných simulací a měření.

Poslední kapitola se zabývá srovnáním všech změřených výsledků. Nejprve jsem porovnal výsledky z laboratorního měření a poté ze simulací programu LightTools. Nakonec jsem porovnal navzájem změřené výsledky z laboratorního měření a ze simulací programu LightTools.

2 Rešerše současných vlastností výkonových LED diod

V dnešní době je LED technologie na velkém vzestupu. Díky vývoji kvalitnějších polovodičových materiálů a celkovému vývoji LED technologie, dosahují LED diody mnohem lepších výkonů a mají mnohem větší možnosti uplatnění. Zkratka LED je z anglického Light Emitting Diode, tedy v českém překladu dioda emitující světlo. LED dioda je polovodičová součástka obsahující PN přechod která vyzařuje světlo [1].

2.1 Princip LED technologie

Světlo ze svítivých diod vzniká na principu elektroluminiscence z PN přechodu v polovodičových materiálech, na kterém vzniká světlo z důsledku přeskoků volných elektronů z vyšších energetických pásů do nižších. Při připojení stejnosměrného napětí na PN přechod v propustném směru dochází k zvýšení počtu minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Díky přechodu elektrického náboje přes PN přechod dochází k rekombinaci děr a elektronů. Rozdíl energie mezi nejnižší hladinou vodivostního pásu a nejvyšší hladinou valenčního pásu odpovídá energii vyzařené ve formě fotonů, neboli světla. Vnik tepla při rekombinaci děr a elektronů v PN přechodu vzniká vlivem přeměny elektrické energie na fonony, kdy energie je využita pro roztřesení mřížky materiálu. Vlnová délka vzniklého záření odpovídá šířce zakázaného pásu a je nepřímo úměrná vyzařené energii. Šířka zakázaného pásu je rozdíl energie mezi nejnižší hladinou vodivostního pásu a nejvyšší hladinou valenčního pásu a je značena E_g . Dle [1].

2.2 Využití LED

Svítivé diody byly dříve používány jen pro indikaci stavu v technických zařízeních, z důvodu nízké svítivosti, jako například indikace aktivního stavu, nebo indikace různé chyby na zařízení a jiné. Dnes již LED diody dosahují mnohem větších svítivých vlastností a mohou se používat pro různá osvětlení, jako například zadní červená světla u automobilů, u křižovatek pro řízení dopravy a podobně. Jako časté využití je také pro systémové strojové snímání, kde je potřeba jasné homogenní osvětlení [1].

2.3 Výkonové LED

Zlepšení svítivosti LED diod ve viditelném spektru byl úchvatný. Stejně jak Moorův zákon říká, že u polovodičových integrovaných obvodů se výkon zdvojnásobí každých 18 měsíců, můžeme říci o výkonu LED diod, že od roku 1960 do roku 2000 se zdvojnásobil každé 4 roky [2].

Jako výkonovou LED diodu, můžeme považovat svítivou diodu, která má výkon větší, nebo rovno 0,5 W. V současnosti se nejvíce používají výkonové LED diody do 5 W, z důvodu největší

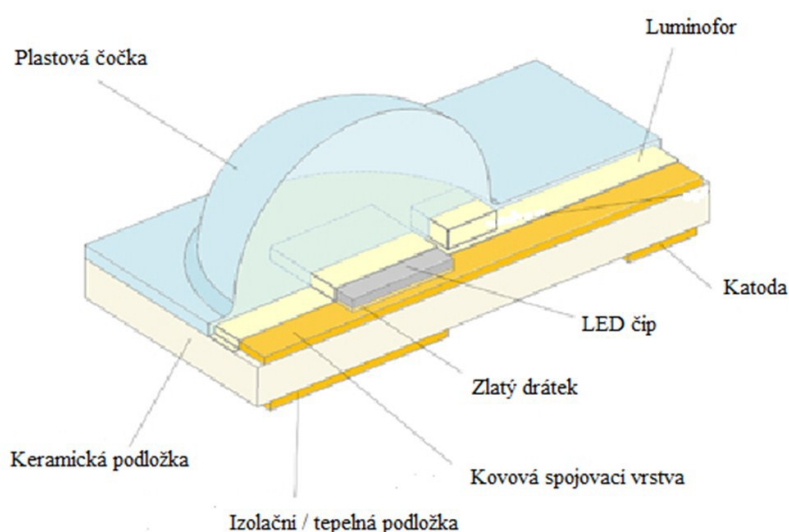
účinnosti. Na trhu se již pohybují výkonové LED diody o výkonu 100 W a svítivosti přes 7000 lm, ale tyto výkonové LED diody potřebují až 3 A napájecího proudu a nezbytné chlazení. Tyto vysoce výkonné LED diody nedosahují zatím takové účinnosti, jako zmiňované výkonové LED diody do 5 W. Dle [1] a [3].

Tedy jejich největší předností je vysoký výkon na poměrně malý prostor, proto je možné lehce tyto diody skládat do různých tvarů a tím dosáhnout velmi dobrých osvětlovacích účinků. Výkonové LED diody vytváří hodně tepla při jejich činnosti, proto je jejich chlazení vysoce důležité pro životnost výkonové LED diody a také pro lepší světelný výkon. Jejich hodnota vyzářeného světla je nepřímo úměrná teplotě, proto se dá říci, že dosahují nejvyšší světelné účinnosti při teplotách pod bodem mrazu. Jejich chlazení je zajištěno hliníkovou plochou, která odvádí teplo směrem od čipu [1].

Díky těmto vlastnostem výkonové LED diody jsou vhodné pro široký rozsah použití v osvětlení, jako je například i veřejné osvětlení. Také pro osvětlení výloh, různých objektů, pracovních desek, či stěn v interiéru i exteriéru [1].

2.4 Konstrukční uspořádání

Jako hlavní částí výkonové LED diody je aktivní část, která se skládá z tzv. nanometrických heterostruktur, které jsou tvořeny ze sloučeniny InGaN. Pro základ čipu výkonové LED diody se nejčastěji používá oxid hlinitý (Al_2O_3), SiC, nebo Si. Výkonová LED dioda by měla být opatřena chladičem, pro odvod tepla, které vzniká z důvodu větších protékajících proudů. Většinou pro chladič je použit hliník [1].



Obrázek 2.1: Řez výkonovou LED diodou [1]

2.5 Parametry výkonových LED

Základní parametry výkonových LED, které uvádí výrobce, jsou potřebné pro výběr specifické výkonové LED, která bude vhodná pro danou aplikaci. Pro dosažení spolehlivosti a záruky správné funkčnosti a životnosti je doporučováno kupovat výkonové LED od renomovaných výrobců [1].

Nejdůležitější parametry výkonových LED:

- vyzařovací úhel;
- CRI = Color rendering Index;
- svítivost - intenzita světelného záření;
- blikání - přerušovaný režim činnosti;
- teplota chromatičnosti - barevná teplota;
- napájení;
- světelná účinnost;
- účinnost;
- teplotní závislost;
- životnost;

2.5.1 Vyzařovací úhel

Výrobce udává, že vyzařovací úhel je úhel, při kterém je vyzářený výkon poloviční, od maximálního výkonu [4]. Vyzařovací úhel je ovlivněn čočkou výkonové LED a také rozměry a umístěním čipu LED. Vyzařovací úhel se u výkonových LED pohybuje v rozsahu 15 - 180 °. Typická hodnota vyzařovacího úhlu výkonových LED je od 90 ° až přes 140 ° [1].

2.5.2 CRI = Color Rendering Index

CRI je index podání barev, kdy jeho hodnota je hodnocení věrnosti podání barev při osvětlení vzniklém z nějakého zdroje a porovnává se z barevného vjemu při osvětlení sluncem. Pro vyjádření indexu podání barev se používá hodnota R_a , která se nachází v rozmezí od 0 do 100. Nulová hodnota R_a vyjadřuje, že se nedají rozeznat barvy při tomto osvětlení. Naopak při hodnotě $R_a = 100$ jsou barvy v tomto osvětlení podány přirozeně. Světelný zdroj, který má hodnotu $R_a > 40$ je považován za vyhovující a při hodnotě $R_a > 70$ se dá říci, že světelný zdroj je průměrný kvalitní zdroj světla [1].

U běžných vláknových wolframových žárovek se tato hodnota R_a pohybuje okolo 95, zatímco u zářivky je to hodnota $R_a = 80$. U sodíkové nízkotlakové výbojky je hodnota $R_a = 0$. U výkonových LED vyzařující bílé světlo se tato hodnota pohybuje obvykle nad 80 [1].

2.5.3 Svítivost - intenzita světelného záření

Intenzita světelného záření výkonové LED diody je přímo úměrná s proudem procházejícím v propustném směru výkonové LED diody. Tato závislost je však silně nelineární, proto řešení regulace svítivosti výkonové LED diody pomocí regulace procházejícího proudu není vhodné [1].

Mnohem vhodnější řešení pro plynulé stmívání výkonové LED diody, nebo celkově regulaci svítivosti výkonové LED diody je použití takového zapojení, kdy propustným směrem neprotéká trvale el. proud, ale jen krátké obdélníkové pulzy s konstantní amplitudou. Frekvence těchto pulzů je dosti vysoká, v řádech desítek kHz, pro setrvačnost oka, kdy okem se vyzářené světlo zdá konstantní [1].

2.5.4 Blikání - přerušovaný režim činnosti

U vláknových wolframových žárovek je odpor rozžhaveného vlákna dosti vysoký, proto při zapnutí hrozí přerušení vlákna, zatímco u výkonových LED dosahuje odpor studeného vlákna podstatně nižších hodnot. Výkonovým LED diodám režim blikání relativně prospívá, z důvodu lepšího chlazení součástky [1].

2.5.5 Teplota chromatičnosti - barevná teplota

Teplota chromatičnosti, nebo také barevná teplota je hodnota, která vyjadřuje světlo vyzářené černým objektem zahřátým na určitou teplotu v Kelvinech. Teplotou chromatičnosti lze dosáhnout mnoha odstínů bílé barvy, jako jsou například studená bílá, čistá bílá, nebo teplá bílá. Na obrázku 2.2 je znázorněna stupnice teploty chromatičnosti, kde lze vidět, že světlo v hodnotě 5500 K teploty chromatičnosti je čistě bílé světlo. Světlo při teplotě chromatičnosti okolo 4000 K je mírně nažloutlé a znázorňuje teplé světlo jako například ze slunce. Naopak při hodnotách 8000 K je světlo mírně namodralé a je vnímáno jako studené světlo [1].



Obrázek 2.2: Stupnice teploty chromatičnosti

2.5.6 Napájení

Vzhledem k tomu, že výkonové LED jsou polovodičové součástky, musí se pro jejich napájení použít zdroj stejnosměrného napětí. Tento zdroj napájí výkonovou LED diodu elektrickým proudem v propustném směru. Hodnota napájecího napětí se u výkonové LED diody pohybuje v jednotkách až desítkách voltů, zatímco napájecí proud je obvykle ve stovkách miliampér až po jednotky ampér [1][3].

2.5.7 Světelná účinnost

Světelná účinnost je množství světla (lumenů), které dokáže výkonová LED vyzářit na 1 Watt elektrického příkonu. U dnešních výkonových LED diod se dokáže světelná účinnost dostat až na hodnotu 100 lm/W. Běžná vláknová wolframová žárovka s výkonem 60 W má světelnou účinnost 15 lm/W, halogenové žárovky 25 lm/W a zářivky 60 lm/W [1]. Dnešní vysoce výkonové LED o výkonu 100 W dokážou vyzářit světlo až nad 10 000 lm, kdy jejich světelná účinnost se pohybuje nad 100 lm/W. Konkrétně výkonové LED HPR40E-19K100WHAA [5], od japonského výrobce Huey Jann Electronics, která dosahuje intenzity světla až 10100 lm a světelné účinnosti 101 lm/W.

2.5.8 Účinnost

Účinnost u všech světelných zdrojů je počet procent elektrické energie přeměněné na světlo (fotony), kdy zbytek elektrické energie je vyzářen ve formě tepla (fonony). Proto je účinnost výkonových LED diod závislá na dobrém chlazení [1].

Účinnost u nejkvalitnějších výkonových LED diod se pohybuje v rozmezí 40 až 50 %. Běžná vláknová wolframová žárovka dosahuje účinnosti kolem 5 %. Vývoj výkonových LED diod se zaměřuje na zvýšení účinnosti, která by mohla přesáhnout hodnotu 50 % [1].

2.5.9 Teplotní závislost

Výkonové LED diody a jejich vyzářený výkon (lm) je závislí na teplotě diody. Při zvýšení teploty z 20 °C až na 120 °C může vyzářené světlo z výkonové LED klesnout až o 40 %, naopak při poklesu teploty na -20 °C může vyzářené světlo stoupnout až o 20 % [3].

2.5.10 Životnost

U výkonových LED diod nedochází jako u wolframových žárovek k úplnému zničení součástky, ale postupem času dochází ke snížení světelného záření. Životnost výkonové LED je závislá na výši teploty a velikosti procházejícího proudu. Čím jsou tyto dvě hodnoty větší, tím se snižuje životnost výkonových LED. Okem zaznamenaný pokles intenzity světla je na 70 %. Některé výkonové LED dosahují 100 % intenzitu světla i při 10 000 hodin provozu [1].

2.6 Vytváření bílého světla u bílých výkonových LED

Bílé výkonové LED diody jsou nejmladším typem svítivých diod. Až začátkem 90. let byl objeven přijatelný způsob výroby pro výkonové LED diody. Význam bílých výkonových LED diod vzrůstá vývojem technologií výkonových LED diod. Generování bílého světla z výkonové LED diod je prováděno pomocí dvou způsobů [1].

2.6.1 Použití více barevných LED

Pro vytvoření bílého světla lze využít míchání různých barev světla.

- modrá - žlutá;
- modrá - zelené - červená (RGB);
- modrá - zelená - žlutá - červená;

2.6.2 Použití luminoforů

Jako nejčastější použití realizace bílého světla výkonové LED diody je použitím kombinace modré LED a vrstvy luminoforu. Luminofor je látka, která je nanesena na povrch čipu a která mění vlnovou délku vyzařovaného světla, tedy její barvu [1].

2.7 Využití výkonových LED

V současné době se použití výkonových LED diod začíná rozšiřovat. Takovou "brzdou" pro čtenější využití jako osvětlení je vysoká cena. Díky velkým světelným účinnostem dnes již výkonové LED diody nahrazují běžné vláknové wolframové žárovky a dokonce jsou již používány pro veřejné osvětlení. Díky vysokým světelným účinnostem a teplotním účinnostem dokážou šetřit spotřebovanou energií s srovnatelným světelným účinkem jako jiné světelné zdroje. Díky malým elektrickým příkonům mohou výkonové LED diody šetřit energii v akumulátorech, a proto jsou výkonové LED diody používány v mnoha přenosných světelných zdrojů [1].

3 Vlastnosti optických prvků vhodných ke tvarování vyzařovací charakteristiky výkonových LED diod

Geometrická optika, která je nazývána paprsková optika, která je založena na představě šíření paprsku prostředím nezávisle jako přímka, a na rozhraní dvou prostředí se řídí zákonem lomu a odrazu. Z hlediska principu je možné uvést, že geometrická optika pracuje s pojmy běžné geometrie. Paprsky šířící se homogenním izotropním prostředím můžeme považovat za geometrické přímky. Z každého světelného zdroje, který považujeme za geometrický bod, vychází paprsky světla všemi směry a vytváří homocentrický svazek paprsků. Každý paprsek prochází prostředím nezávisle na ostatních, jakoby v daném prostředí procházel jediný paprsek. Základní úlohou geometrické optiky je přeměnit homocentrický svazek paprsků, vycházejícího ze světelného zdroje, opět ve homocentrický svazek paprsků, sbíhající se do obrazového bodu [6][7].

Světlo, nebo také optické záření, budeme chápat jako elektromagnetické záření, které má určitou vlnovou délku z rozsahu od 1 nm do 1 mm. Často se světlo chápe jako elektromagnetické záření ve viditelné oblasti vlnových délek a to od 380 nm do 750 nm. Světlo se šíří prostředím, které ovlivňuje šíření svými parametry. Dané prostředí definuje veličina index lomu a to je dáno, jako poměr rychlosti šíření světla ve vakuu a rychlosti šíření světla v daném prostředí. Vzorec pro výpočet indexu lomu je dán vzorcem 2.1. V čitateli proměnná c je rychlost světla ve vakuu, tedy $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a v je rychlost světla v prostředí [6].

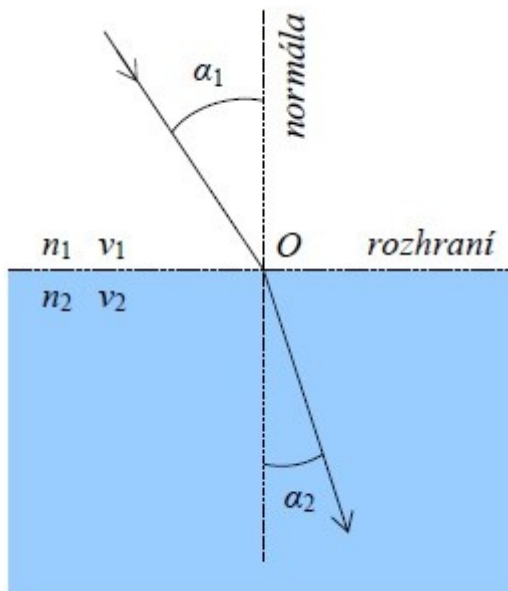
$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

3.1 Optické čočky a jejich vlastnosti

Čočka je nejpoužívanější optický prvek v optice. Obecně můžeme říct, že čočka je tvořena dvěma sférickými plochami oddělující tři různá prostředí. Její základní vlastnosti jsou ohnisková vzdálenost, polohy hlavních rovin a index lomu, který je dán materiálem čočky. Více v [7]. Dalšími parametry čočky jsou poloměry obou ploch čočky. Pro popis vlastností čoček se používá výše zmíněná geometrická optika [8].

Nejzákladnější vlastností optické čočky je lom a odraz paprsku na rozhraní dvou optických prostředí, neboli na ploše čočky. Tato vlastnost se řídí zákonem lomu a odrazu. Lom paprsku na rozhraní dvou prostředí se zabývá Snellův zákon lomu, pro který platí vztah (3.1), kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu dvou prostředí. Ve vztahu v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření světla v obou prostředích. Úhel α_1 je úhel mezi dopadajícím paprskem na rozhraní dvou prostředí a normálou. Úhel α_2 je úhel mezi lomeným paprskem v prostředí n_2 a normálou. Tento vztah je znázorněn na obrázku 3.1. Dle [8].

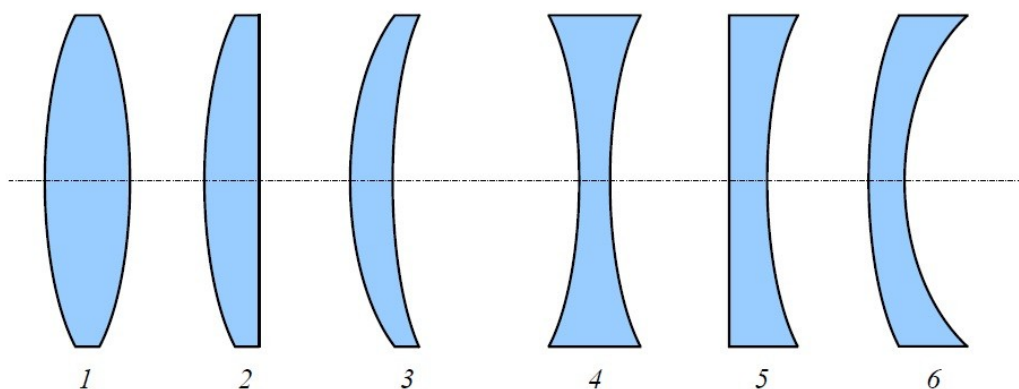
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1: Lom paprsku na rozhraní dvou prostředí [8]

3.2 Základní druhy optických čoček

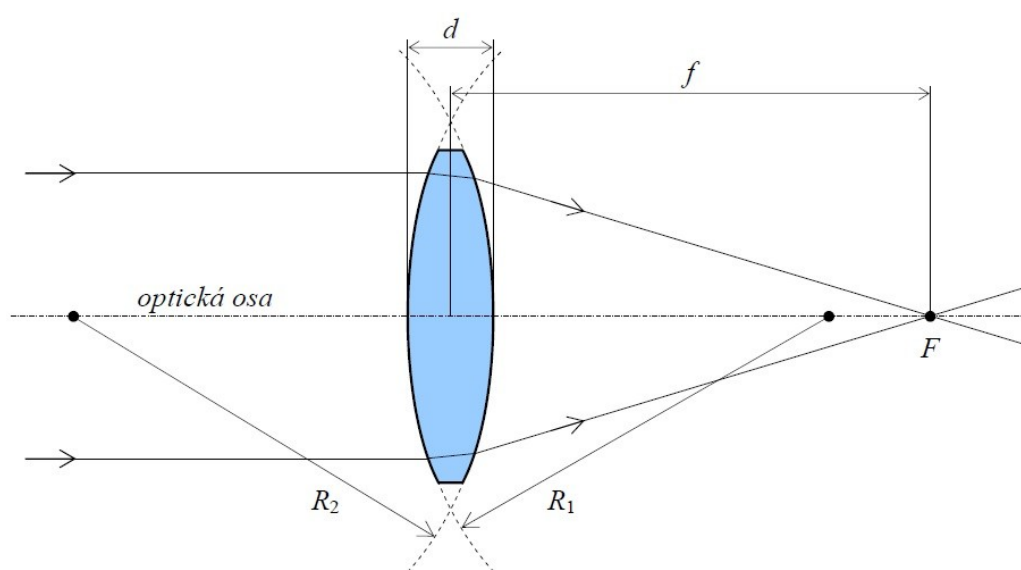
Rozdělení čoček je dáno podle toho, jaký má vliv na paprsek, který prochází čočkou. Spojné čočky lámou paprsek směrem do ohniska, které se značí F , neboli paprsky vycházející ze spojné čočky jsou sbíhavé. Vytvářejí tedy obraz, který se nachází před čočkou. Opačné optické čočky jsou rozptylky, které mění paprsky na rozbíhavé. Ohnisko F rozptylné čočky leží před čočkou, kde vytváří takzvaně zdánlivý obraz. Na obrázku 3.2 jsou znázorněny základní druhy čoček [8].



Obrázek 3.2: Základní druhy optických čoček (1-bikonvexní, 2-plankonvexní, 3-konkávkonvexní, 4-bikonvexní, 5-plankonvexní, 6-konvexkonkávni)[8]

3.2.1 Spojná čočka

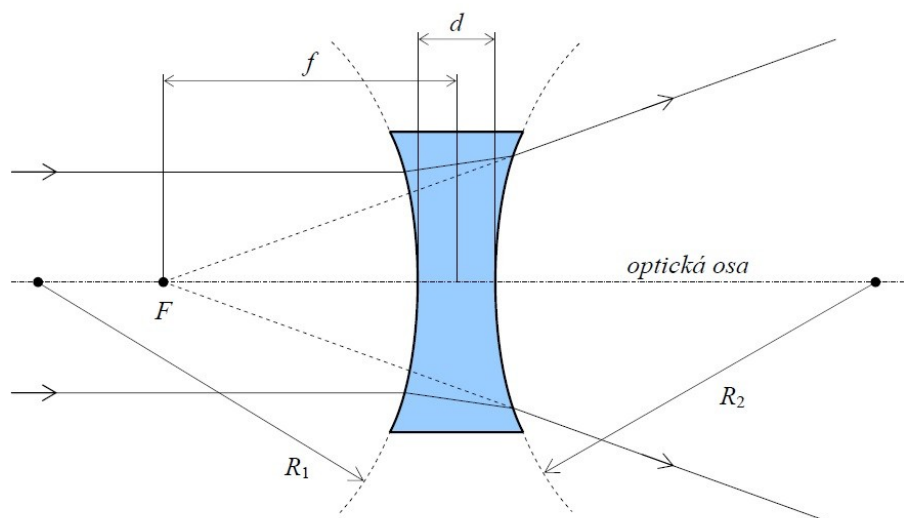
Spojené čočky, nebo také spojky, soustředí všechny paprsky vstupující do optické čočky z nekonečna do jednoho bodu, který se nazývá ohnisko F . Spojná čočka má vždy jeden povrch vypuklý a na okrajích je vždy užší, než ve středu. V brýlích se tyto čočky používají pro nápravu dalekozrakosti. Spojné čočky mohou být bikonvexní, nebo-li dvojbypuklé, což znamená, že mají oba své povrchy vypuklé. Spojka, která má jeden povrch vypuklý a druhý rovinný se nazývá ploskovypuklá, nebo také plankonvexní. Dutovypuklé, nebo také konkávkonvexní spojky se nazývají takové, které mají jeden povrch čočky vypuklý a druhý dutý. Na obrázku 3.3 je znázorněn průchod paprsků spojnou čočkou [8].



Obrázek 3.3: Průchod paprsků spojnou čočkou (F -ohnisko, f -ohnisková vzdálenost, d -tloušťka čočky, R_1, R_2 - poloměry sférických ploch)[8]

3.2.2 Rozptylná čočka

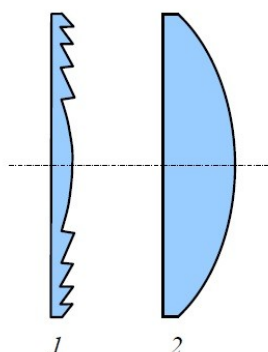
Rozptylné čočky, nebo také nazývané zkráceně rozptylky, se chovají přesně obráceně jak spojky. Paprsky vstupující z nekonečna do rozptylné čočky jsou lomeny směrem od optické osy. Ohnisko je proto tvořeno před diodou, kde vytváří takzvaně zdánlivý obraz. Rozptylná čočka má vždy jeden povrch dutý a ve středu je užší než na krajích. V brýlích se tyto čočky používají pro nápravu krátkozrakosti. Bikonkávní, nebo též dvojduté čočky mají oba povrchy duté. Rozptylné čočky, které mají jeden povrch dutý a druhý rovinný se nazývají plankonkávní, nebo také ploskoduté. Vypukloduté čočky, které se též nazývají konvexkonkávní, mají jeden povrch dutý a druhý vypuklý. Na obrázku 3.4 je znázorněna rozptylná čočka a její průchod paprsků [8].



Obrázek 3.4: Průchod paprsků rozptylnou čočkou (F -ohnisko, f -ohnisková vzdálenost, d -tloušťka čočky, R_1, R_2 - poloměry sférických ploch)[8]

3.2.3 Fresnelova čočka

Pokud bychom chtěli využít čočku větších rozměrů, nastává problém, že optická čočka by byla moc těžká a široká. Proto se jako náhrada velkých čoček vyrábí Fresnelova čočka. Pro lom paprsků slouží pouze povrch čočky, neboli rozhraní dvou optických prostředí, a ne ve vnitřní části čočky. Vnitřní část čočky je v této situaci zbytečná, proto Fresnelova čočka může být mnohem užší. Fresnelova čočka má na povrchu mírné vroubkování a je velmi tenká a její hmotnost je také malá, což je velká výhoda. Materiál pro výrobu těchto čoček může být sklo, nebo také plast. Využití těchto čoček je hlavně ve zpětných projektozech. Dále se také používají u majáků policejních a pohotovostních vozidel, také u velmi plochých lup, nebo semaforů a světel motorových vozidel atd. Na obrázku 3.5 je porovnání tloušťky Fresnelovy čočky s klasickou čočkou [8].



Obrázek 3.5: Srovnání Fresnelovy čočky s klasickou čočkou (1-Fresnelova čočka, 2-klasická čočka) [8]

3.2.4 Kuličková čočka

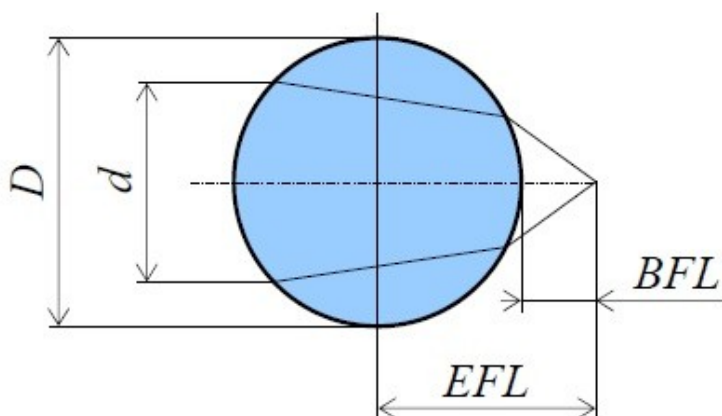
Kuličková čočka je nejčastěji používána na navázání světelného svazku do optického vlákna. Je velmi významným optickým prvkem pro lepší optické vazby mezi optickými vlákny, zářiči a detektory. Na obrázku 3.6 je znázorněna kuličková čočka společně s jejími parametry. Efektivní ohnisková vzdálenost EFL lze vypočítat ze dvou parametrů čočky a to z průměru čočky D a indexu lomu materiálu čočky na dané vlnové délce. Zadní ohnisková vzdálenost BFL lze lehce vypočítat, protože efektivní ohnisková vzdálenost se měří od středu čočky. Vztah (3.2) je pro výpočet EFL a vztah (3.3) je pro určení BFL [8].

$$EFL = \frac{n \cdot D}{4 \cdot (n - 1)} \quad (3.2)$$

$$BFL = EFL - \frac{D}{2} \quad (3.3)$$

Pro výpočet numerické apertury NA , je zapotřebí vztah (3.4), kde n je index lomu skla, D je průměr čočky a d je vstupní průměr čočky [8].

$$NA = \frac{2d \cdot (n - 1)}{n \cdot D} \quad (3.4)$$



Obrázek 3.6: Kuličková čočka [8]

Při použití kuličkové čočky pro navázání do optického vlákna, je kuličková čočka umístěna přímo na optickém vlákne. Pro správnou funkčnost kuličkové čočky, musí být numerická apertura NA kuličkové čočky menší, než numerická apertura NA vlákna. Toto pravidlo je důležité pro zamezení úniku záření z kuličkové čočky [8].

3.3 Optické vady čoček

Optické vady, nebo také aberace, jsou odchylky mezi obrazem vytvořeným reálnou optickou soustavou a obrazem vytvořeným ideální optickou soustavou. Ideální optická soustava zobrazuje obraz tak jak je jeho vzor, přesně bod na bod. Příčinou optické vady může být způsobena neprůchodností několika paprsků. Další důvody optické vady mohou být absorpce, odraz a lom paprsku v optické soustavě. Optické vady se odlišují na monochromatické a chromatické vady. Chromatické vady jsou způsobené rozkladem světla na barvy, při použití bílého širokospektrálního světla [8].

3.3.1 Barevná vada

Barevná vada je způsobena odlišným indexem lomu paprsků s různými vlnovými délkami. Díky tomuto rozdílnému lomu je pro každou vlnovou délku jiná ohnisková vzdálenost. Pro kratší vlnové délky je index lomu vyšší, zatímco pro delší vlnové délky je index lomu nižší. Díky tomuto jevu je bílé světlo rozloženo na spektrum barev, kdy tento jev lze v přírodě pozorovat jako duha, kdy sluneční paprsky se rozkládají na barvy po průchodu kapkami vody [8].

Pro minimalizaci barevné vady se provádí achromatizace optické soustavy, což znamená, že se použije vhodná kombinace spojných a rozptylných čoček. Jako další způsob minimalizace této vady je možno použít difrakční člen. Difrakční člen je optický prvek s difrakční mřížkou, který má opačnou barevnou vadu jako optická soustava a tím se barvená chyba vyruší [8].

3.4 Optické reflektory (koncentrátory)

Při navázání optického signálu do vlákna v optických komunikacích se může ze zdroje šířit široký optický kužel, který pokrývá velkou oblast. V těchto situacích je optická hustota na vstupu vlákna nízká a pro sběr optického výkonu je potřeba velké efektivní oblasti. Pro řešení těchto situací se používají optické reflektory nebo koncentrátory. Optický koncentrátor se používá na straně sběru paprsků do optického vlákna, nebo snímače, zatímco optické reflektory se používají na straně optického zářiče, kdy se upravuje vyzářený světelný kužel. Tyto optické reflektory dokážou zúžit optický kužel vyzářený ze zdroje a tím zlepšit koncentraci výkonu do optického vlákna. Také se zlepši bezpečnost zraku, protože není potřeba používání tak výkonných světelných zdrojů [9]. Protože všechny zdroje pojednávají o teorii optických koncentrátorů a ne reflektorů, byla použita teorie o optických koncentrátorech i pro reflektory.

3.5 Základní druhy optických reflektorů (koncentrátorů)

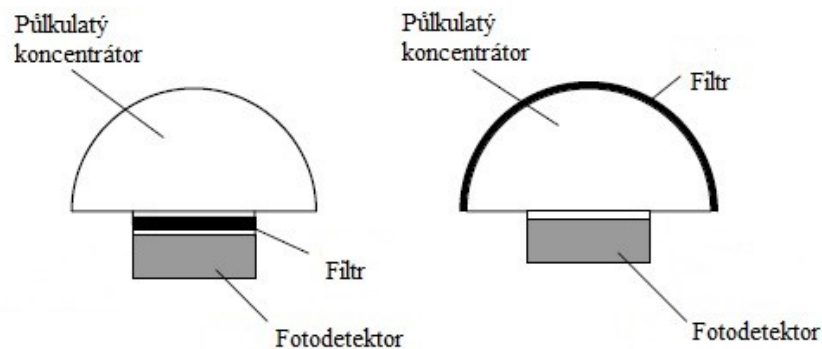
Koncentrátory se dají rozdělit do dvou základních kategorií a to do obrazových a neobrazových koncentrátorů. Obrazové koncentrátory jsou takové, které musí zobrazit obraz na straně detektoru přesně tak, jak byl vytvořen ve zdroji. Neobrazové koncentrátory neřeší, jestli

paprsky vycházející ze zdroje dopadají ve správném pořadí a umístění tak, jak byli vytvořeny zdrojem. Řeší pouze jejich sběr a soustředění na určitý prostor. Pro úpravu kužele paprsků v optických telekomunikacích je zapotřebí neobrazových koncentrátorů [9].

3.5.1 Půlkulatý koncentrátor (hemispherical)

Je to jeden z nejoblíbenějších neobrazových koncentrátorů, díky jeho jednoduchosti, nízké ceně a širokému zornému poli. Díky tomu má široké uplatnění v mnoha bezdrátových aplikacích. Například je specifický pro použití jako koncentrační prvek v infračerveném pásmu, jako například infračervený port v mnoha mobilních telefonech, notebooků a osobních počítačů. Díky širokému zornému poli přijímá také mnoho šumu, který parazituje při příjmu informací. Zásadní požadavek pro dobrou funkčnost půlkulatého koncentrátoru je, aby měl větší rozměry než detektor. Na obrázku 3.7 je zobrazen půlkulatý koncentrátor s detektorem uprostřed. Paprsky jdoucí ze zdroje ze spodu dopadají na plochu koncentrátoru a odrážejí se do středu, kde je detektor [9].

Půlkulatý reflektor je v podstatě to stejné, jen místo detektoru se do středu umístí zdroj světelného záření. V praxi se můžeme s půlkulatým reflektorem setkat u stolních lamp, nebo pouličních lamp, kdy světlo z žárovky, či jiného zdroje světla, je pomocí reflektoru odražen potřebným směrem.

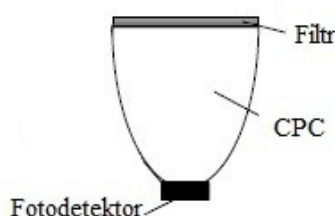


Obrázek 3.7: Půlkulatý koncentrátor, vlevo bez filtrů, vpravo s možností použití filtrů [9]

3.5.2 Složený parabolický koncentrátor (CPC)

Další optický prvek pro bezdrátovou komunikaci je složený parabolický koncentrátor, který má mnoho výhod oproti půlkulatému koncentrátoru. Jednou z výhod je, že může obsahovat ploché tenkovrstvé optické filtry, které jsou jednodušší na výrobu než půlkulaté optické filtry. Jako další výhoda oproti půlkulatému koncentrátoru je, že CPC může být navržen tak, aby podporoval dané zorné pole, neboli u reflektorů vyzařovací úhel a to od 0° do 90° a díky tomu získat větší zisk. Díky tomu lze použít menší a levnější fotodetektory což zlepšuje rychlost systému a snižuje náklady na přijímač. Nevýhoda CPC je větší délka. Na obrázku 3.8 je znázorněn CPC [9].

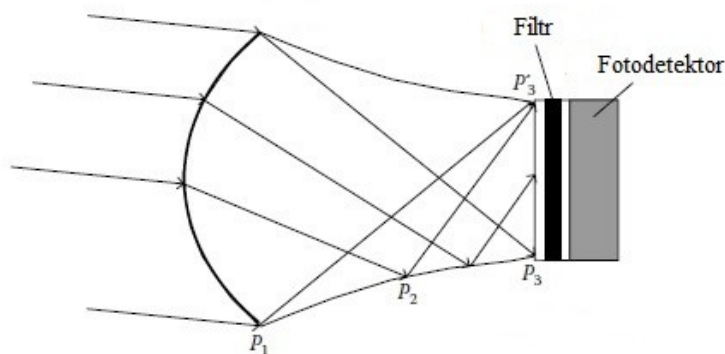
Složený parabolický reflektor je stejný jak složený parabolický koncentrátor, jen má prohozený vstupní a výstupní otvory, proto místo detektoru je světelný zářič. V praxi lze složený parabolický reflektor najít u ručních svítilen, kde je zapotřebí menšího vyzařovacího úhlu a větší koncentraci světla na menší oblast.



Obrázek 3.8: Složený parabolický koncentrátor [9]

3.5.3 Dielektricky plně vnitřně odrazující koncentrátor (DTIRC)

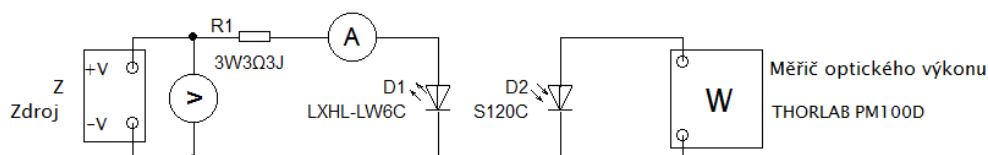
Jedná se o upravený CPC, aby nebylo zapotřebí tak dlouhých koncentrátorů. Tento reflektor dosahuje koncentrace blízké maximálního limitu. DTIRC je založen na kombinaci lomu paprsků na předním povrchu koncentrátoru a úplném odrazu od bočnic koncentrátoru. Na rozdíl od půlkulatého koncentrátoru nabízí vyšší koncentrace a možnost použití plochých optických filtrů. Ve srovnání s CPC má DTIRC dvě výhody. První výhoda je menší velikost, z důsledku použití zakřiveného vstupního otvoru a druhá je větší koncentrace díky vyšší hodnotě indexu lomu dielektrického materiálu koncentrátoru. Tyto reflektory byly navrženy pro solární energii a pro aplikace s optickými vlákny. Později s kombinací použití filtrů se začali používat pro optické bezdrátové komunikační přijímače. Na obrázku 3.9 je zobrazen DTIRC. Při umístění světelného zářiče namísto fotodetektoru lze použít jako optický reflektor [9].



Obrázek 3.9: Koncentrátor DTIRC [9]

4 Měření v laboratoři

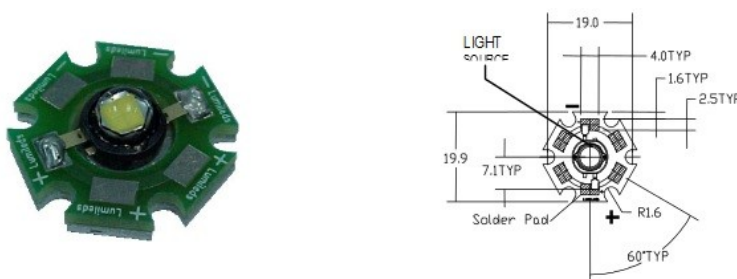
Pro měření v laboratoři byla použita výkonová LED LXHL-LW6C [4], která je znázorněna na obrázku 4.2. Dále byl použit fotodetektor S120C [10] od firmy THORLABS, měřící přístroj výkonu THORLABS PM100D [11], výkonový odpor 5W3Ω3J, zdroj stejnosměrného napětí DIAMETRAL P230R51D a ampérmetr. Schéma zapojení je na obrázku 4.1. Pro uchopení prvků a jednoduchou manipulaci byly použity elektronické posuvné lišty NRT 150/M [12] od firmy THORLABS. Na řízení motorů posuvných lišt byly použity řídicí jednotky TST001 [13], které byli připojeny k počítači. Jako voltmetr bylo použito informativní měřidlo zabudované ve zdroji napětí. Při měření byl použit konstantní proud 700 mA a přibližná teplota okolí 25 °C. Napětí se pohybovalo okolo 8,8 V při zmiňovaném proudu 700 mA.



Obrázek 4.1: Schéma měření výkonové LED diody

4.1 Výkonová LED LXHL-LW6C

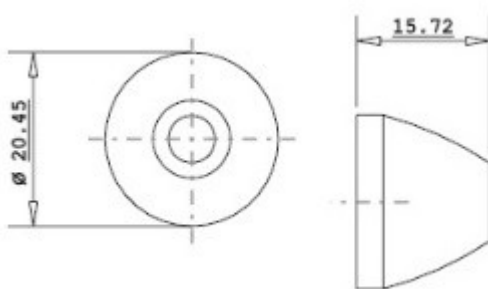
Je to pěti wattová výkonová LED, která emituje bílé světlo o svítivosti 120 lm. Její vyzařovací úhel, který je udáván výrobcem je 120 °. Teplota chromatičnosti bílého světla, které výkonová LED emituje, je od 4500 K po 8000 K, typicky 5500 K. Výkonová LED LXHL-LW6C je širokospektrální, to znamená, že emituje světlo o velkém rozdílu vlnových délek, konkrétně od 370 nm po 775 nm. Více v [4].



Obrázek 4.2: Výkonová LED LXHL-LW6C

4.2 Parabolický reflektor CLP20CR

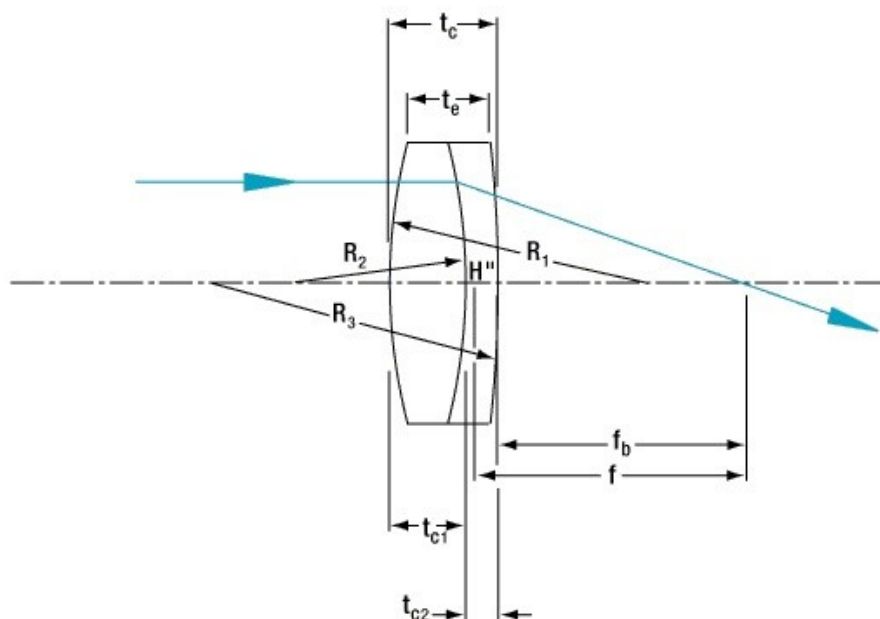
Pro tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody byl použit optický parabolický reflektor CLP20CR. Série CLP nabízí dva reflektory určené pro LED s Lambertovskou křivkou svítivosti. Tyto reflektory byly navrženy s cílem získat úzký vyzařovací svazek s perfektním homogenním středovým bodem. Reflektor CLP20CR má vyzařovací úhel 6° . Výrobce udává, že reflektor CLP20CR zvýšil intenzitu světla ve vzdálenosti jednoho metru od LED diody až 52x, zatímco ve dvou metrech už to bylo jen 25x a ve třech metrech od LED diody 12x. Reflektor CLP20CR má průměr 20,45 mm, jeho hloubka je 15,72 mm a je vytvořen z polykarbonátu s vnitřní metalickou vrstvou pro odraz světla. Více na [14].



Obrázek 4.3: Reflektor CLP20CR (vlevo pohled zezadu, vpravo pohled z boku)

4.3 Achromatická čočka AC254-030-A-ML

Jako další prvek pro tvarování vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody byla použita achromatická čočka AC254-030-A-ML. Tato optická čočka je složena ze dvou čoček pro minimalizaci chromatické chyby čočky. Optická čočka je zapouzdřena do pouzdra obsahující závit pro lepší uchycení a manipulaci v určité aplikaci. Je určena pro použití ve viditelném spektru, od 400 nm do 700 nm. Její pracovní teploty se pohybují mezi -40°C a 85°C . Ohniskové vzdálenost od středu čočky f je 30 mm a ohnisková vzdálenost od hrany čočky f_b je 23 mm. Na obrázku 4.4 je znázorněna achromatická čočka AC254-030-A-ML s parametry, kdy f je ohnisková vzdálenost od středu čočky, f_b je ohnisková vzdálenost od hrany čočky, R je poloměr křivosti, t_c udává tloušťku ve středu čočky, t_e je tloušťka na okrajích čočky a H je hlavní rovina. Více na [15].

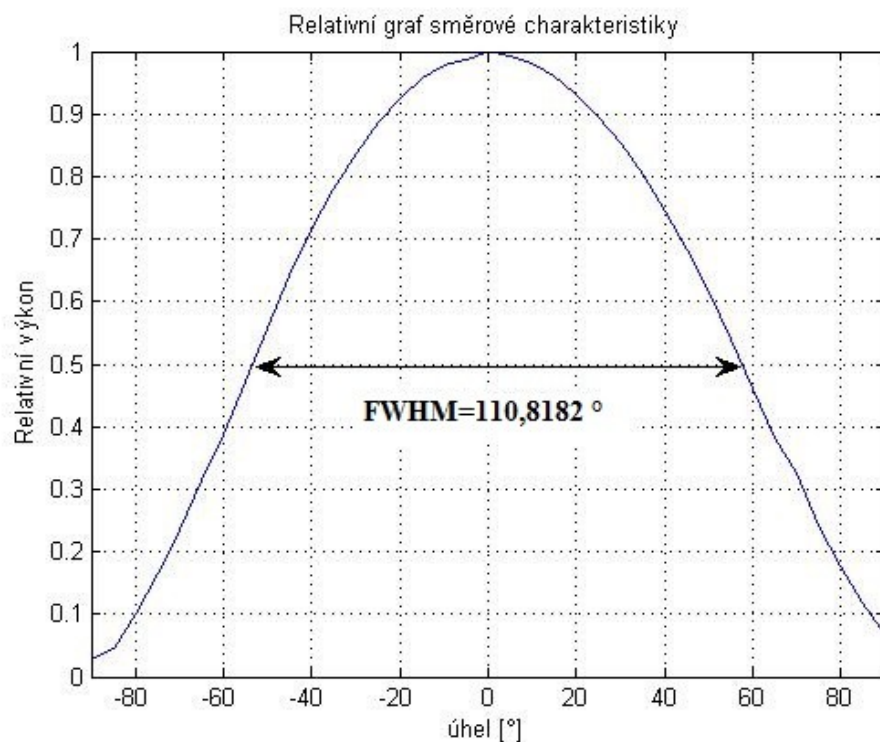


Obrázek 4.4: Achromatická čočka AC254-030-A-ML a její optické parametry

4.4 Směrová vyzařovací charakteristika výkonové LED diody

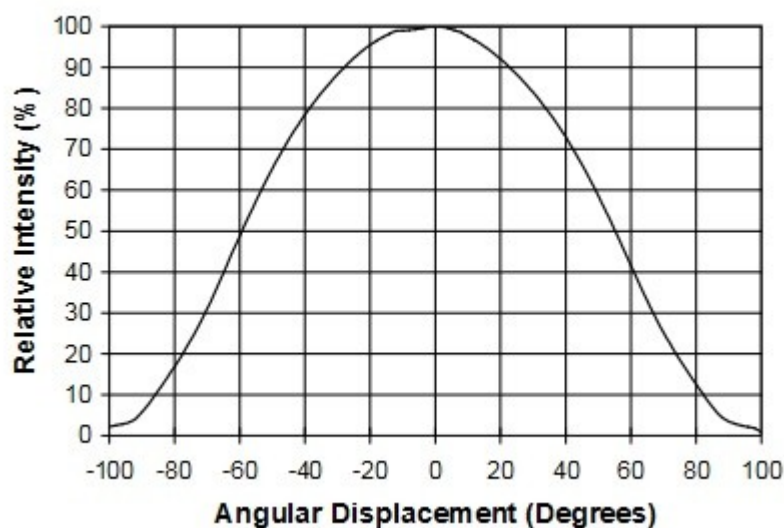
Měření směrové charakteristiky probíhalo v 37 krocích. Od 90° do -90° po 5° . Výkonová LED byla upevněna na nehybný držák a fotodetektor S120C byl připevněn na otočnou rukojeť se stupnicí úhlu. Po 5° se otáčelo čidlo až do -90° a na druhou stranu do 90° , tedy kdy bylo čidlo na straně výkonové LED diody. Měření muselo probíhat v úplné tmě, aby se zamezilo parazitnímu světlu na detektoru.

Na obrázku 4.5 je graf relativní směrové charakteristiky výkonové LED. Vypočítaná *FWHM* z naměřených hodnot vyšla $110,8182^\circ$. Z grafu a naměřených hodnot lze vyčíst, že výkonová dioda má největší intenzitu světla v 0° , tedy přímo v optické ose. Díky výpočtu *FWHM* bylo zjištěno, že dioda svítí v úhlu $110,8182^\circ$, co je za touto hranicí, má již menší jak polovinu maximálního světelného výkonu. Z tohoto měření vyplývá, že výkonová LED LXHL-LW6C má vyzařovací úhel $\pm 55,4091^\circ$.



Obrázek 4.5: Graf směrové vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody

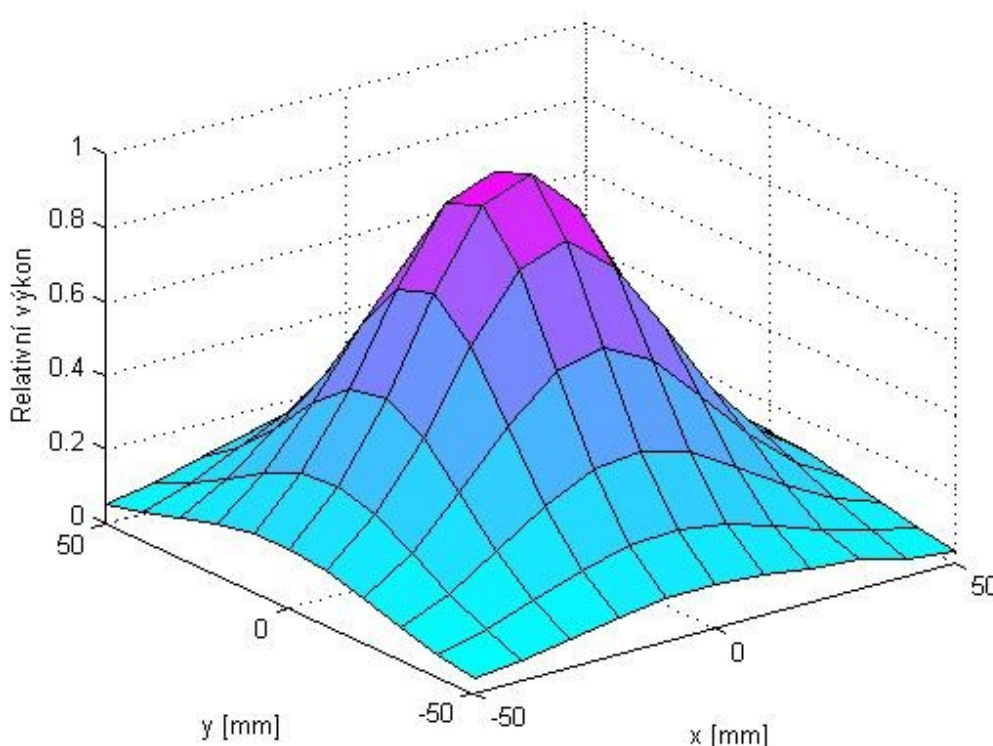
Výrobce udává, že výkonová LED dioda má vyzařovací úhel $\pm 60^\circ$, tedy pro $FWHM = 120^\circ$. Na obrázku 4.6 je graf vyzařovací charakteristiky udávaný výrobcem. Z grafu 4.6 lze vyčíst, že $FWHM$ není rovných 120° , ale přibližně 115° . Hodnota $FWHM$ z grafu 4.6 nelze přesně určit, z důvodu nedostatku přesnějších dat.



Obrázek 4.6: Graf směrové charakteristiky výkonové LED diody udávaný výrobcem

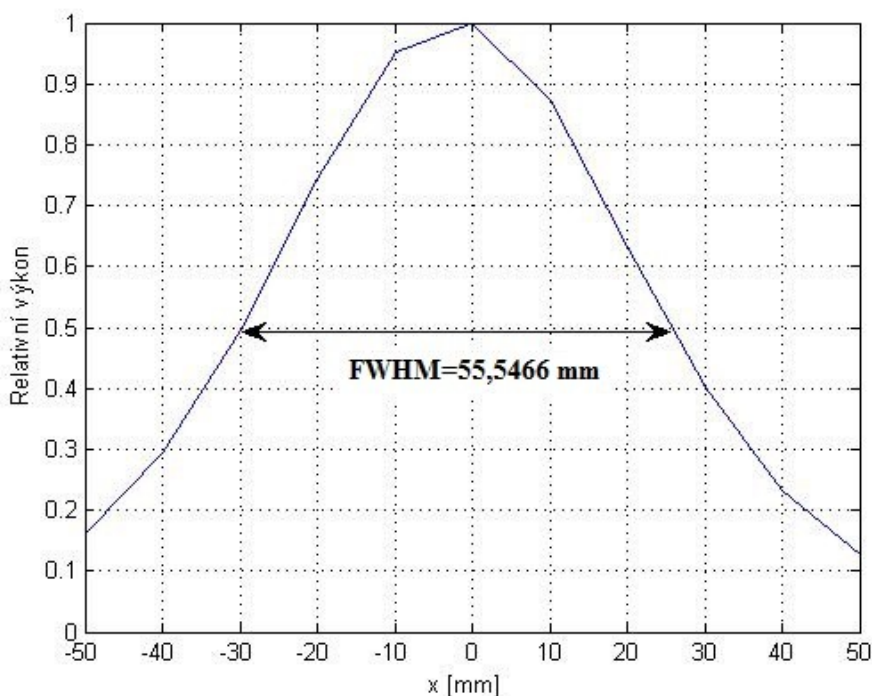
4.5 Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru

Jako další parametr bylo měřeno rozložení výkonu. Nejprve proběhlo měření výkonové LED bez reflektoru a jiného optického prvku. Výkonová LED s chladičem byla upevněna do stojanu. Fotodetektor S120C byl připevněn na posuvné lišty ovládané počítačem. Lišty byly připevněny tak, aby jedna posouvala fotodetektorem v ose x a druhá v ose y. Fotodetektor se nacházel ve vzdálenosti 50 mm od výkonové LED diody. Krok posunu byl nastaven pomocí programu od firmy THORLABS na 1 cm. Pro fotodetektor nacházející se přímo naproti výkonové LED se nastavila pozice (0,0) pro (x,y). Měření začalo na pozici fotodetektoru (-5,5), tedy vlevo nahoře a po jednom kroku se posouval fotodetektor vpravo po ose x na pozici (5,5), kde se fotodetektor nacházel po deseti krocích. Poté se posunulo druhou posuvnou lištou po ose y ve směru dolů na pozici (5,4). Dále následoval posun po ose x směrem doleva na pozici (-5,4). Takto se postup opakoval, dokud se neproměřil výkon ve všech pozicích a skončilo se v pozici (5,-5). V každé pozici fotodetektoru proběhl odečet výkonu z měřicího přístroje THORLABS PM100D. Výsledná změřená plocha se rovná 100 cm². Z naměřených hodnot byl sestaven graf pomocí programu MATLAB, který je znázorněn na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Graf rozložení výkonu výkonové LED diody bez reflektoru ve vzdálenosti 5 cm

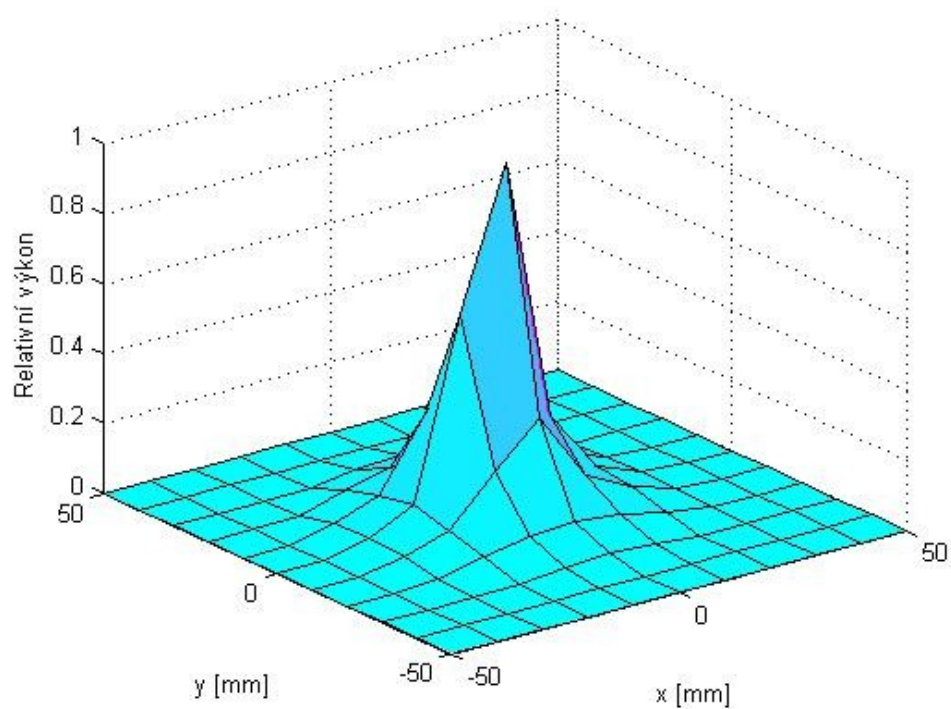
Z naměřených hodnot v ose $y=0$ byl sestaven 2D graf a vypočítána $FWHM$. Graf je zobrazen na obrázku číslo 4.6, kde $FWHM$ vyšla 55,5466 mm. Výsledná hodnota $FWHM$ soužší pro lepší porovnání šířky rozložení výkonu.



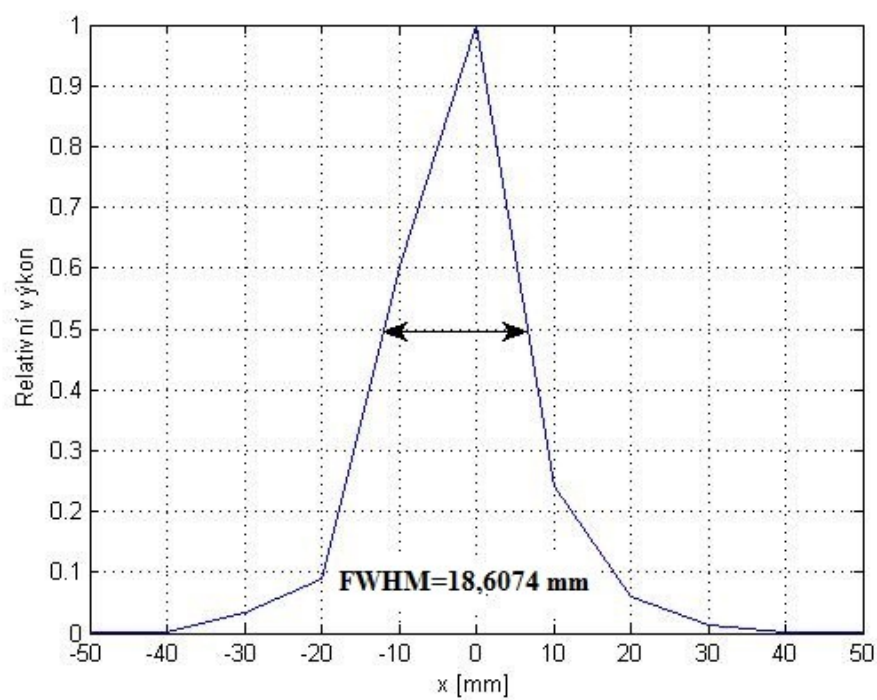
Obrázek 4.8: $FWHM$ pro měření bez reflektoru ve vzdálenosti 5cm

4.6 Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu s reflektorem

Před měřením se na výkonovou LED diodu přilepil pomocí vteřinového lepidla parabolický reflektor CLP20CR. Dále měření probíhalo stejným způsobem jako měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru, který je popsán v předchozí kapitole 4.5, tedy ve vzdálenosti 50 mm od výkonové LED diody na ploše 100x100 mm. Sestavený graf se nachází na obrázku 4.7, kde jde zřetelně vidět rozdíl oproti měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru v grafu na obrázku 4.9. Z naměřených hodnot středem charakteristiky byl sestaven 2D graf pro výpočet $FWHM$, který je na obrázku 4.10. $FWHM$ vyšla pro toto měření 18,6074 mm.



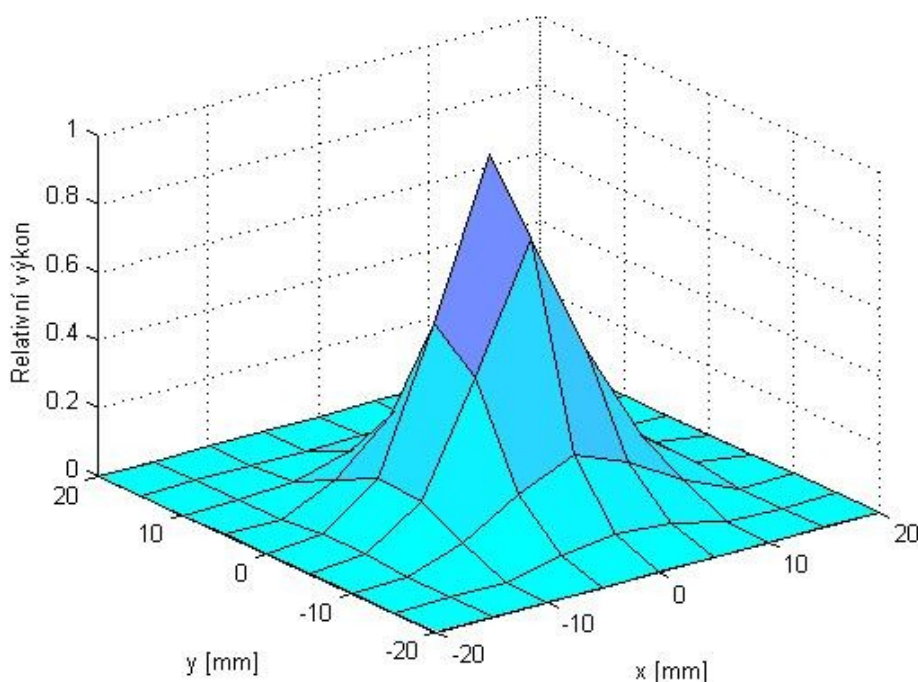
Obrázek 4.9: Graf rozložení optického výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR ve vzdálenosti 5 cm



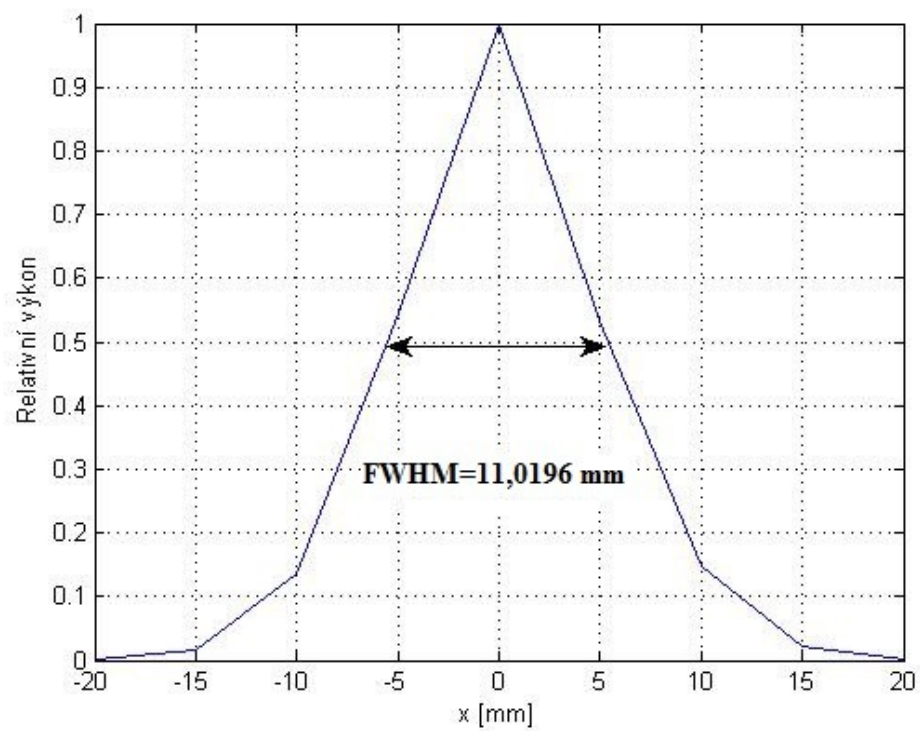
Obrázek 4.10: Graf FWHM pro výkonovou LED diodu s reflektorem ve vzdálenosti 5 cm

4.7 Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu s reflektorem a optickou čočkou

Těsně před výkonovou LED diodu LXHL-LW6C s již přilepeným reflektorem CLP20CR se připevnila na měřicí stůl pomocí úchytů stavebnice THORLABS achromatická optická čočka AC254-030-A-ML. Optická čočka byla otočena tak, aby paprsky jdoucí z výkonové LED diody a odražené od reflektoru vstupovali do optické čočky ze strany, kde výrobce udává vstup paprsků jdoucí z nekonečna. Jelikož šířka plochy rozložení výkonu byla již o mnoho užší, měření probíhalo na ploše 20x20 mm. Dále měření probíhalo stejně jako měření rozložení výkonu výkonové LED diody v kapitole 4.5 s tím rozdílem, že byl použit krok 5 mm. Měření probíhalo ve čtyřech vzdálenostech a to 30 mm, 25 mm, 20 mm a 15 mm od hrany čočky. Po srovnání výsledků z těchto čtyřech měření, bylo zjištěno, že nejnižší FWHM má rozložení výkonu ve vzdálenosti 15 mm od hrany čočky. Na obrázku 4.11 je výsledný 3D graf rozložení výkonu po použití reflektoru CLP20CR a optické čočky AC254-030-A-ML. Na obrázku 4.12 je dále 2D graf s vypočítanou hodnotou *FWHM*. Hodnota *FWHM* byla vypočítána pomocí programu MATLAB z 2D grafu rozložení výkonu. Výsledné *FWHM* pro toto měření vyšlo 11,0196 mm.



Obrázek 4.11: Graf rozložení optického výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a optické čočky AC254-030-A-ML ve vzdálenosti 1,5 cm



Obrázek 4.12: 2D graf pro rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a optickou čočkou AC254-030-A-ML ve vzdálenosti 1,5 cm

5 Simulace v programu LightTools

LightTools je komplexní software pro optické konstrukce a analýzy. Používá se pro virtuální prototypy, simulace, optimalizace a fotorealistické vizualizace pro přesné světelné aplikace. Jeho robustní technologie pro 3D modelování poskytuje nevyhnutelné přesnosti potřebné pro simulaci cest světelných paprsků, jak vcházejí a vycházejí z optických prvků a mechanických konstrukcí. Plně integrovaný systém optimalizačních nástrojů ke zlepšení výkonu pro jakoukoliv optickou soustavu dramaticky sníží potřebný čas pro dokončení návrhu. Od LCD obrazovek přes osvětlení vozidla až po systémy projektorů. LightTools podporuje všechny směry světelných projektů [16].

5.1 Struktura LightTools

LightTools má několik modulů, které mohou být poskládány tak, aby co nejlépe vyhovovaly potřebám uživatele [17].

5.1.1 Core module

Je to základní modul, nezbytný pro fungování všech ostatních modulů. Také tento základní LightTools modul poskytuje funkce pro 3D modelování pro vytváření a vizualizaci optických a mechanických objektů, spolu také s určením vlastností materiálů a optických povrchů. Mezi funkce pro zvýšení efektivity práce v programu patří intuitivní uživatelské rozhraní, knihovny úkolů, knihovny vzorových příkladů a specifické nástroje. Základní modul také dává možnost programového rozšíření pro automatizaci pracovních postupů [17].

5.1.2 Illumination module

Tento modul umožňuje návrhářům simulovat a analyzovat světlo tak, jak prochází optickými a mechanickými prvky optického modelu. Tento modul poskytuje návrhářům přesné předpovědi jasu a intenzity osvětlení v celém modelu. Tyto výkonné analýzy osvětlení, jako fotorealistické ztvárnění, které ukazují účinky světelných zdrojů v modelu simulují reálné podmínky a díky tomu lze snížit potřebu vytvářet reálné prototypy [17].

5.1.3 Optimization module

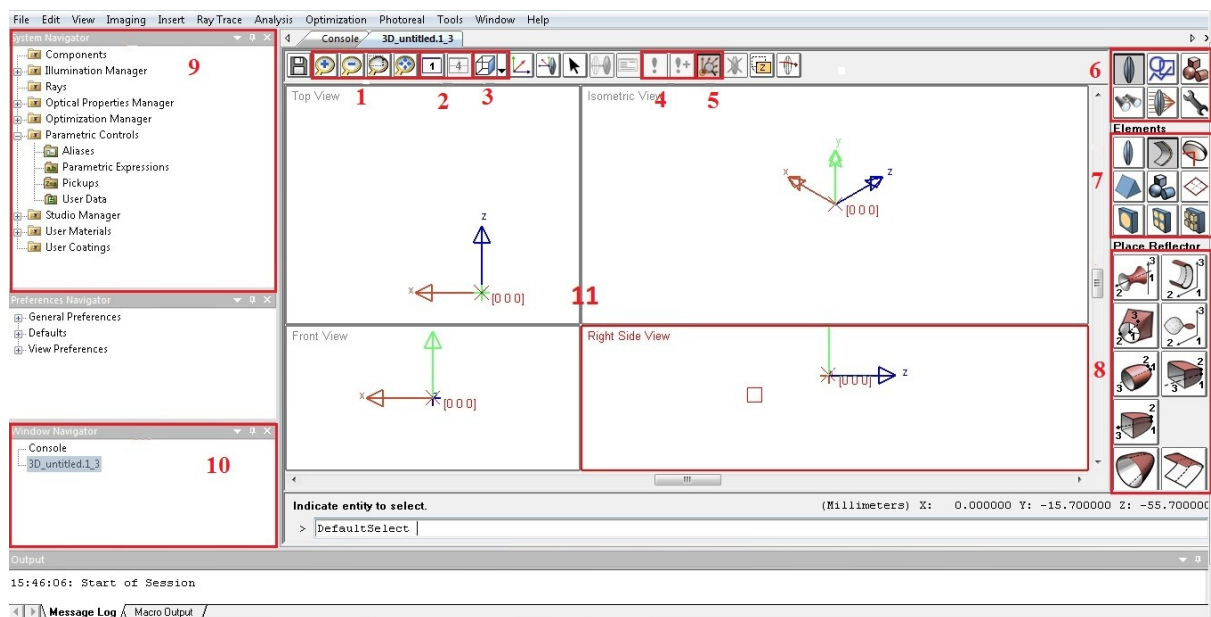
Optimalizační modul automaticky zvyšuje efektivitu prakticky jakéhokoli typu osvětlovací soustavy a poskytuje návrhářům obrovskou pružnost při výběru ze stovek systémových parametrů, které určují například veličiny, omezení a výkonnostní kritéria, aby bylo dosaženo požadovaného výkonu optického systému. Plně propojení s LightTools modelovacím prostředím, zajišťuje, že optimalizační modul poskytuje praktická a realistická řešení za zlomek času, který by byl zapotřebí k dosažení ručně [17].

5.1.4 Advanced Physics Module

Modul který rozšiřuje LightTools o pokročilou fyziku. Tento modul dává další optické možnosti modelování, jako je řezání hran. Návrháři mohou využít programových rozšíření pro vyvinutí vlastní optické části a pokročilé optické subsystemy, jako jsou polarizační prvky, povlaky a jiné speciální optické materiály, včetně přechodu indexu materiálů. Výsledky mohou být uloženy do přenosného formátu a vyměněny se svým projektovým týmem, zákazníkem, dodavatelem a subdodavatelem. Schopnosti pro vytváření a přiřazování fosforových materiálů jsou rovněž zahrnuty do tohoto modulu [17].

5.2 Prostředí programu LightTools

Práce v programu LightTools nebyla nijak složitá, jen bylo potřeba se seznámit s několika nástroji a prostředím programu. Prostředí programu LightTools je velice podobné programům známým běžným uživatelům, jako například Microsoft Word, nebo Open Office Writer. Na obrázku 5.1. je znázorněno prostředí programu LightTools.



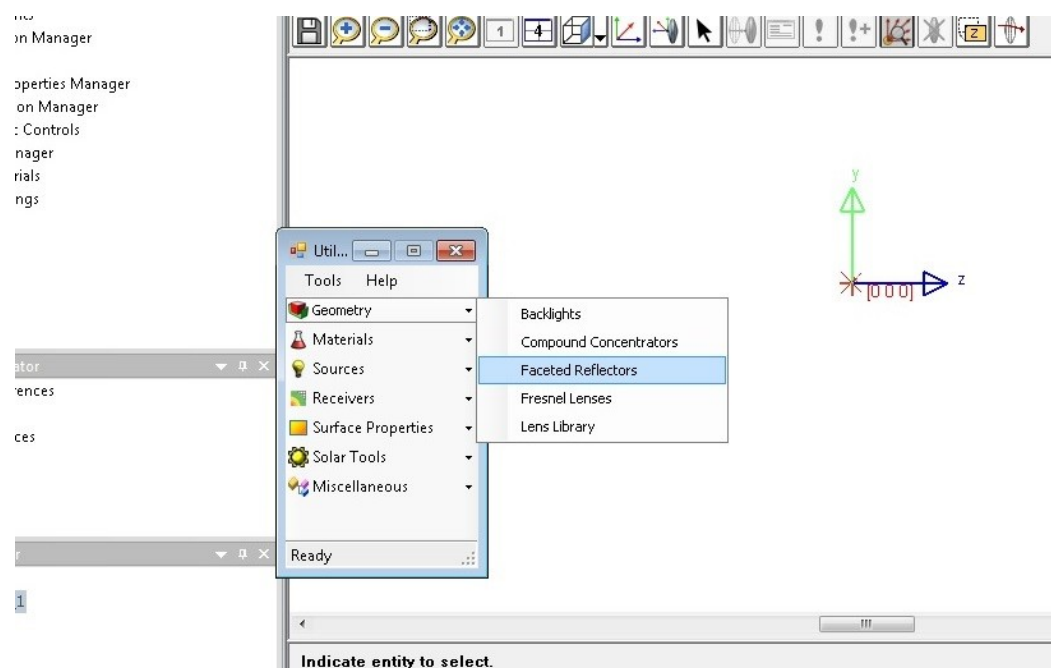
Obrázek 5.1: Prostředí programu LightTools

1. Čtyři tlačítka pro manipulaci pohledu. Zleva, přiblížení pohledu, oddálení pohledu, výběr pohledu výřezem a posledním tlačítkem se pohled sám upraví tak, aby byly vidět všechny prvky v aktivní oblasti. Pro přiblížení a oddálení pohledu lze také použít kolečko myši, nebo kombinace držení levého Ctrl + pravého tlačítka myši a pohyb myši nahoru či dolů. Pro pohyb po pracovním plátně (11) je dobré používat kombinaci držení tlačítek levý Shift a pravého tlačítka myši a následný pohyb myši.

-
2. Tyto dvě tlačítka mají za úkol přepínat mezi rozdělení pracovní plochy na jedno podokno, nebo na čtyři podokna, kde každé zobrazuje pohled z jiné strany na objekt. Pro práci bylo používáno výhradně rozdělení na jedno jediné podokno.
 3. Po kliknutí na toto tlačítko se vyroluje nabídka pro výběr pohledu, z jaké strany se chceme dívat na náš objekt. Pro rychlejší a preciznější natáčení pohledu lze využít držení pravého tlačítka myši a pohybem myši měnit úhel pohledu.
 4. Tyto dvě tlačítka jsou velice důležitá, protože zajišťují zpuštění procesu. První tlačítko znázorněné jako červený vykřičník spouští všechny simulace. Vedle něj, znázorněné jako červený vykřičník se znaménkem plus, je tlačítko pro pokračování simulace, která byla přerušena.
 5. Poslední důležité tlačítko, které zapíná nebo vypíná zobrazení paprsků.
 6. Toto je hlavní nabídka příkazů, nebo také funkcí, která se dál dělí. Nachází se tam šest kategorií. První kategorie jsou Prvky, kde se nachází funkce pro tvorbu čoček, zrcadel, různých objektů a ploch. V simulaci byla použita jen jedna funkce z této kategorie a to pro vytvoření plochy pro přijímač. Další kategorií je modelování 2D objektů, tato kategorie ani nebyla použita. Třetí kategorie je pro vytvoření mechanických objektů, taktéž nebyla využita. Čtvrtá kategorie je zobrazení, která nabízí úpravu pohledu, nastavení os, nebo měření vzdáleností a úhlů. V této kategorii bylo využito měření vzdáleností. Pátá kategorie je hodně bohatá na funkce. Nabízí práci s paprsky, to znamená, že nabízí vytvářet různé světelné zdroje, vytvářet jednotlivé paprsky, upravovat jejich trajektorii a hlavně nabízí vytvoření přijímačů. Zde byly využity dvě funkce pro vytvoření přijímačů. Poslední kategorie nabízí upravování, ať už se jedná o 2D objekty, nebo 3D objekty. Z této kategorie bylo využito 3D upravování a to přímo funkce pro ořezání objektů.
 7. Tato část zobrazuje podkategorie funkcí, které spadají do nadřazené kategorie.
 8. Třetí úroveň seznamu funkcí a nástrojů.
 9. Systémový navigátor, kde lze vybírat jednotlivé prvky. Velmi efektivně usnadní navigaci a pohyb mezi prvky optického systému.
 10. Navigátor oken, který usnadňuje orientaci a přepínání se mezi okny. Při simulaci v programu je možno si zobrazit mnoho výsledků a grafů a díky navigátoru oken se nám bude lépe orientovat v nepřehledném množství oken.
 11. Jako poslední je samotné pracovní plátno, nebo také se dá říct pracovní okno, kde probíhá veškeré modelování a vytváření optického systému.

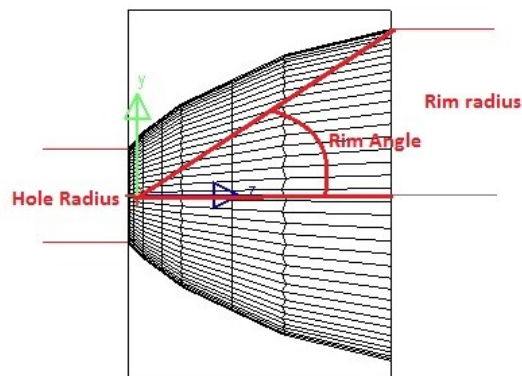
5.3 Modelování reflektoru CLP20CR

Tento reflektor, aby mohl být simulován v programu LightTools, musel být prvně vytvořen pomocí funkcí 3D modelování. V záložce "Tools" se nachází "Utility Library", neboli knihovna pro specifické nástroje. Po kliknutí na "Utility Library" v záložce "Tools", se otevřelo menší okno, kde je na výběr několik podkategorií. Pro vymodelování reflektoru bylo vybráno v záložce "Geometry" "Faceted Reflectors", jak je vidět na obrázku 5.2.

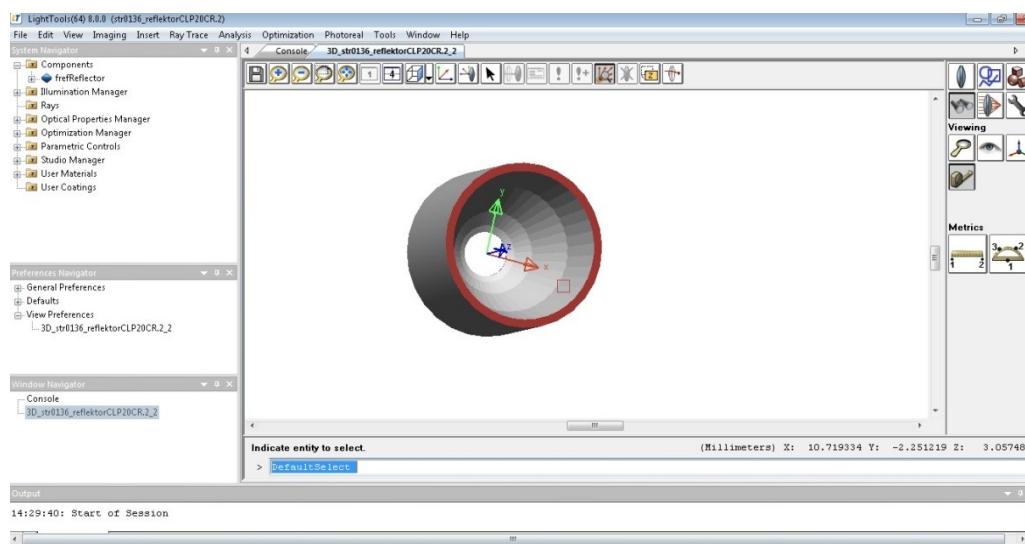


Obrázek 5.2: Výřez programu LightTools: výběru nástroje pro vymodelování reflektoru

Po vybrání Faceted Reflectors se otevřelo okno se dvěma záložkami pro nastavení parametrů. V druhé záložce Source/Receiver jsou vlastnosti pro vytvoření zdroje a přijímače světla. Pro modelování to není nutné, a proto všechny pole v této záložce musí být nezaškrtnuty. V první záložce Reflector Data jsou parametry pro vymodelování reflektoru. Stačilo zadat 3 parametry pro rozměr reflektoru, a to Rim Radius, což je poloměr konce reflektoru, Hole Radius, ten udává poloměr otvoru na začátku reflektoru a poslední Rim Angle, který nám udává úhel mezi osou reflektoru a přímkou procházející ohniskem a jdoucí k hraně reflektoru. Pro vymodelování reflektoru CLP20CR byli zadány hodnoty Rim Radius 10,22 mm, Hole Radius 3 mm a Rim Angle 3°. Nástroj pro vymodelování reflektoru vymodeloval reflektor velmi nepřesně, proto bylo potřeba provést další řadu úprav pro požadovaný výsledek. Po ořezání a dalších úpravách vznikl konečný reflektor CLP20CR, který je na obrázku 5.3, kde jsou znázorněny i rozměry zadané pro vymodelování reflektoru.



Obrázek 5.3: Výsledný vymodelovaný reflektor z boku s parametry pro vymodelování



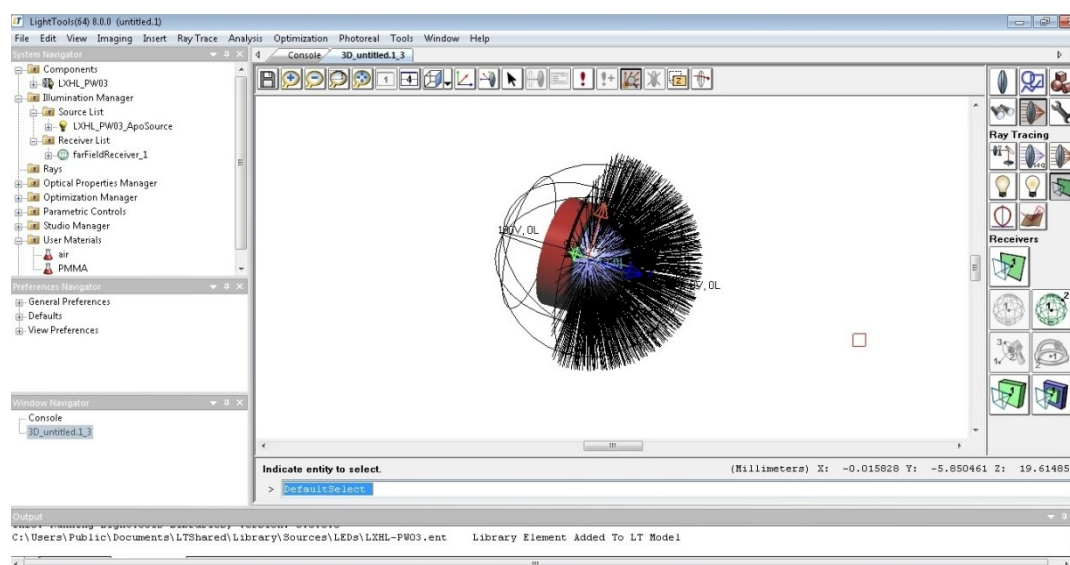
Obrázek 5.4: Vymodelovaný reflektor CLP20CR v LightTools ve 3D

5.4 Směrová vyzařovací charakteristika výkonové LED diody pomocí simulace v programu LightTools

Cílem tohoto měření bylo provést stejné měření jako v laboratoři, které je popsáno v kapitole 4.1. Pro toto měření byla použita výkonová LED dioda LXHL-PW03, která se nachází v knihovně programu LightTools. Tato výkonová LED dioda má stejná parametry jako výkonová LED dioda LXHL-LW6C, která byla měřena v laboratoři.

Jako první krok se musela vložit výkonová LED dioda do simulačního prostředí programu. V záložce Tools byla vybrána položka LED Library.... Po kliknutí na tuto položku se otevřelo další okno, kde bylo na výběr z mnoha LED diod. Do aktivního pole vpravo nahoře nadepsané jako "Search by Model #" byl zadán celý název výkonové LED diody LXHL-PW03. Po nalezení této výkonové LED diody se vložila do simulačního prostředí pomocí tlačítka Create LED.

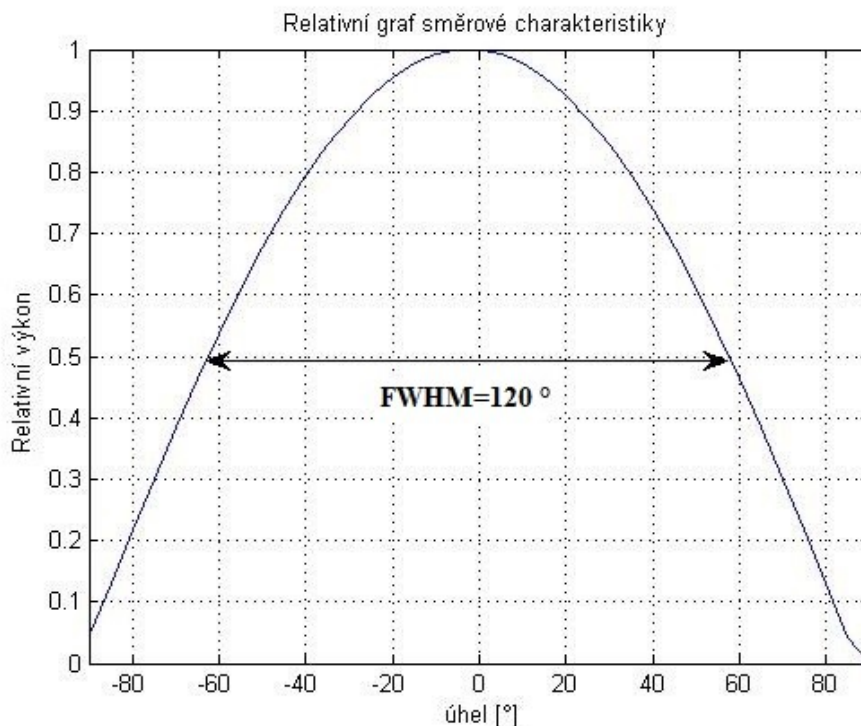
Poté, co měřená výkonová LED dioda byla vložena do simulačního prostředí programu LightTools, mohlo se přejít k samotnému simulování. Samotná výkonová LED dioda nestačí pro měření, ale je potřeba i přijímače, jak tomu bylo v laboratorním měření. Vpravo v nabídce nástrojů a funkcí byl vybrán "Ray Tracing", česky jako trasování paprsků, znázorněno jako obrázek čočky s červenými paprsky. Dále byla vybrána další podkategorie "Receivers", česky přijímače. Jako poslední byla vybrána již funkce "AddFarFieldReceiver". Tento přijímač snímá paprsky ze všech směrů kolem výkonové LED diody. Pokud by se v pracovním okně nacházelo více prvků, než jen výkonová LED dioda, tento přijímač by snímal všechny paprsky jdoucí z celé optické soustavy. V záložce "Ray Trace" výběr "Simulations Input" lze nastavit počet paprsků pro simulaci a počet zobrazených v pracovním okně. Bylo nastaveno jeden milión paprsků pro simulaci a tisíc paprsků pro zobrazení v pracovním okně. Počet nastavení paprsků nemá žádný vliv na měřené výsledky, jen se jedná o větší přesnost měření při více paprsků. Výsledek po proběhnutí simulace je znázorněn na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Měření směrové vyzařovací charakteristiky výkonové LED diody v programu LightTools

Simulace proběhla, a proto již stačilo jen dostat výsledná data. Funkce nacházející se pod Analysis/Intensity Display/Line Chart zobrazí graf směrové charakteristiky od 0 ° do 360 °. Tento graf nebyl ve formě, v jaké bylo potřeba, proto v System Navigatoru se našel použitý přijímač a jeho Intensity Mesh, neboli tabulky naměřených hodnot. Pravým tlačítkem na Intensity Mesh se otevřela nabídka a bylo vybráno Properties. Otevřelo se okno s možností nastavení tabulky pro data. Po úpravách, aby data byli od -90 ° do 90 ° a po krocích 5 °, tak jak bylo měřeno v laboratoři se v záložce Mesh Data označila tabulka s hodnotou a zkopírovala se do libovolného textového souboru.

Tyto data se upravila a pomocí Matlabu se vytvořil graf tak, aby odpovídal vytvořenému grafu z laboratorního měření. Tento graf je znázorněn na obrázku 5.5.



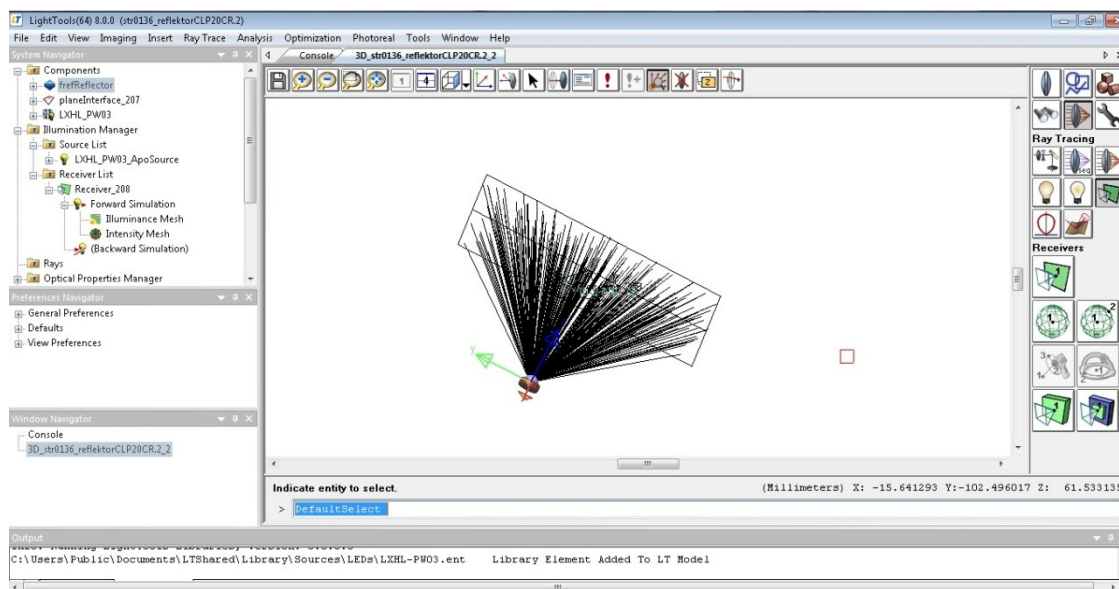
Obrázek 5.5: Směrový vyzařovací charakteristika výkonové LED diody měřená programem LightTools

Jak je z grafu vidět, $FWHM$ vyšla 120, tedy přesně jak udává výrobce $\pm 60^\circ$. Výsledné měření pomocí simulaci v LightTools nevyšla stejně jak v laboratoři, protože LightTools nesimulovalo přesné podmínky, jako byli v laboratoři, jako jsou malé odlišnosti parametrů výkonové LED diody dané výrobou, neideální prostředí pro šíření světla, odrazy světla, neideální fotodetektor a jiné. Rozdíl mezi naměřenou směrovou charakteristikou vyzařovací charakteristiky pomocí simulaci v programu a danou výrobcem je nulová.

5.5 Měření rozložení výkonu pro výkonovou LED diodu bez reflektoru pomocí simulace v programu LightTools

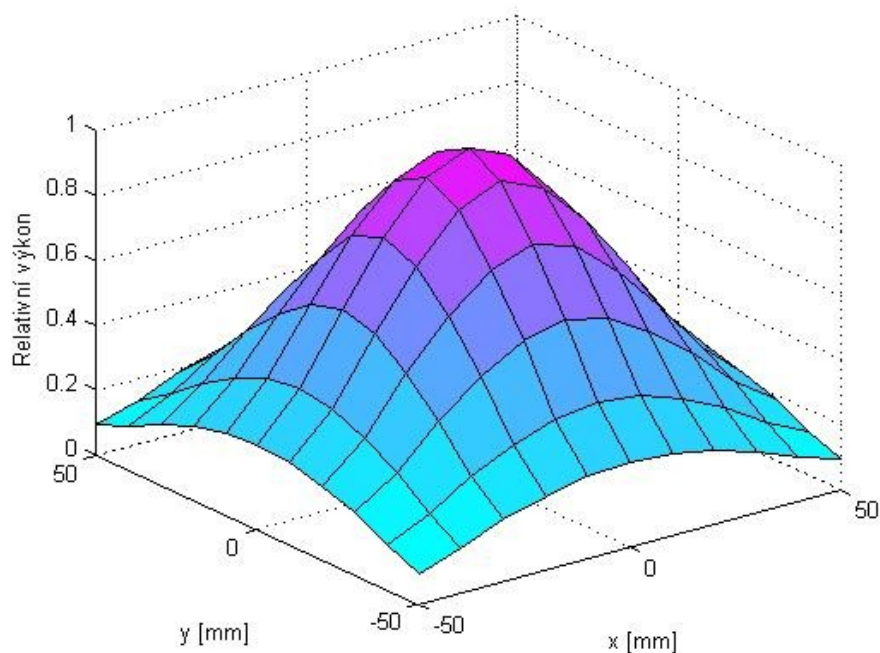
Stejně jak byla měřena směrová vyzařovací charakteristika diody LXHL-PW3 z knihovny programu LightTools, tak se měřilo i rozložení výkonu. Rozdíl byl v tom, že bylo potřeba jiného přijímače, proto přijímač pro směrovou vyzařovací charakteristiku se odstranil pomocí tlačítka Delete na klávesnici poté, co byl v System Navigator nalezen a pomocí kliknutí myši označen. Pomocí Elements/Dummy Surfaces/DummyPlane v pravo v nabídce funkcí a nástrojů, byla vytvořena plocha pro příjem paprsků. Pomocí Properties vytvořené plochy byly nastaveny rozměry této plochy na čtverec o straně 100 mm, jak tomu bylo v laboratorním měření. Dále pomocí nabídky funkcí

a nástrojů byl vybrán SelectReceiver, který je k nalezení pod Ray Tracing/Receivers. Jednoduchým kliknutím myši na již vytvořenou plochu čtverce pro příjem paprsků se snímač připnul k této ploše. Po spuštění simulace vypadal výsledek tak, jak je znázorněno na obrázku 5.6.



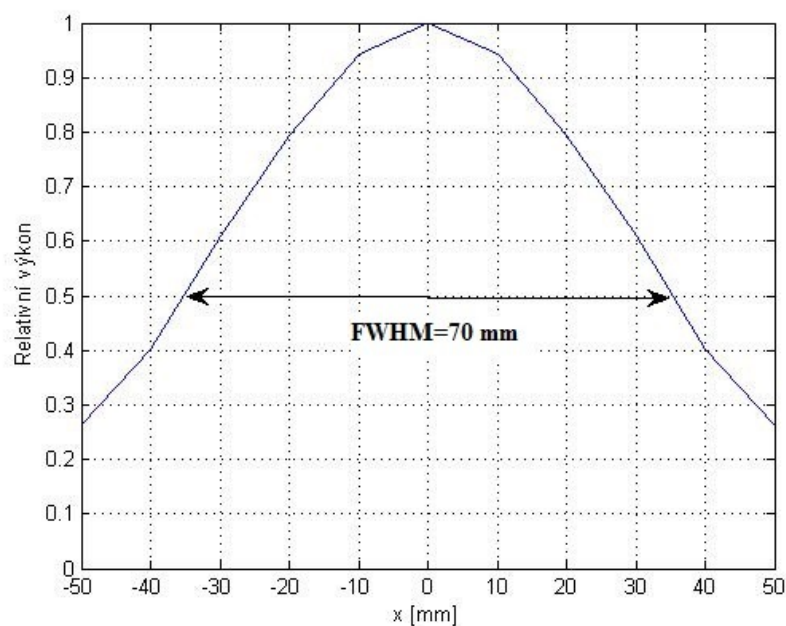
Obrázek 5.6: Simulace rozložení výkonu výkonové LED diody v programu LightTools ve vzdálenosti 5 cm

Po získání výsledných dat z měření, které byly získány pomocí LumViewer v záložce Analysis/Illuminance Display. Funkce LumViewer zobrazí i výsledný graf, který nebyl použit z důvodu špatného srovnání s grafy z měření v laboratoři. Proto pomocí Edit / Mesh Properties se nastavila tabulka výsledných hodnot do potřebného stavu a poté se díky Edit / Copy data to Clipboard zkopírovala tabulka naměřených hodnot do libovolného textového dokumentu, kde po menších úpravách se z těchto hodnot mohl pomocí matlabu vytvořit graf, který je na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Graf rozložení výkonu výkonové LED diody bez reflektoru ve vzdálenosti 5 cm změřený simulací v programu LightTools

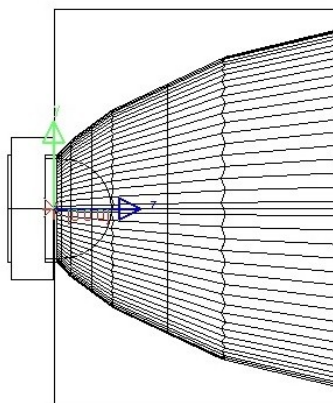
Graf vzniklý simulací nevyšel stejný jako graf z měření v laboratoři, ale rozdíl není tak viditelný, proto byl z naměřených hodnot vytvořen také 2D graf a vypočítána *FWHM*. Tento graf se nachází na obrázku 5.8. Výsledná hodnota *FWHM* je 70 mm.



Obrázek 5.8: 2D graf pro rozložení výkonu výkonové LED diody bez reflektoru s vypočítanou hodnotou *FWHM*

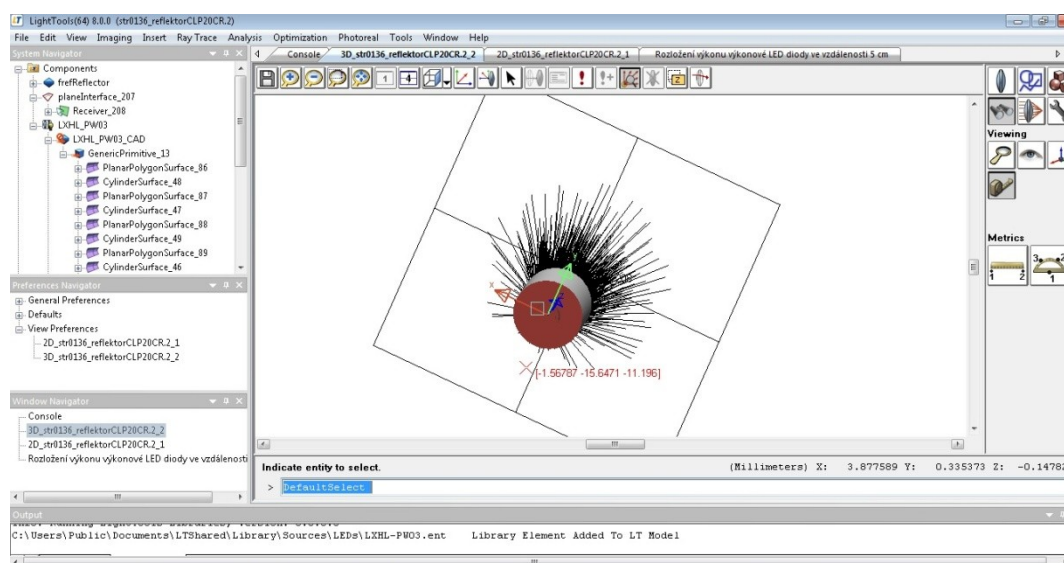
5.6 Měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem pomocí simulace v programu LightTools

Měření proběhlo stejně jako v kapitole 5.5 měření rozložení výkonu výkonové LED diody bez reflektoru pomocí simulace v programu LightTools, jen s tím rozdílem, že před diodu byl nasazen vymodelovaný reflektor CLP20CR, kde jeho modelování je popsáno v kapitole 5.3 a jeho technické údaje v kapitole 4. Na obrázku 5.9 je znázorněna výkonová LED dioda spolu s reflektorem.

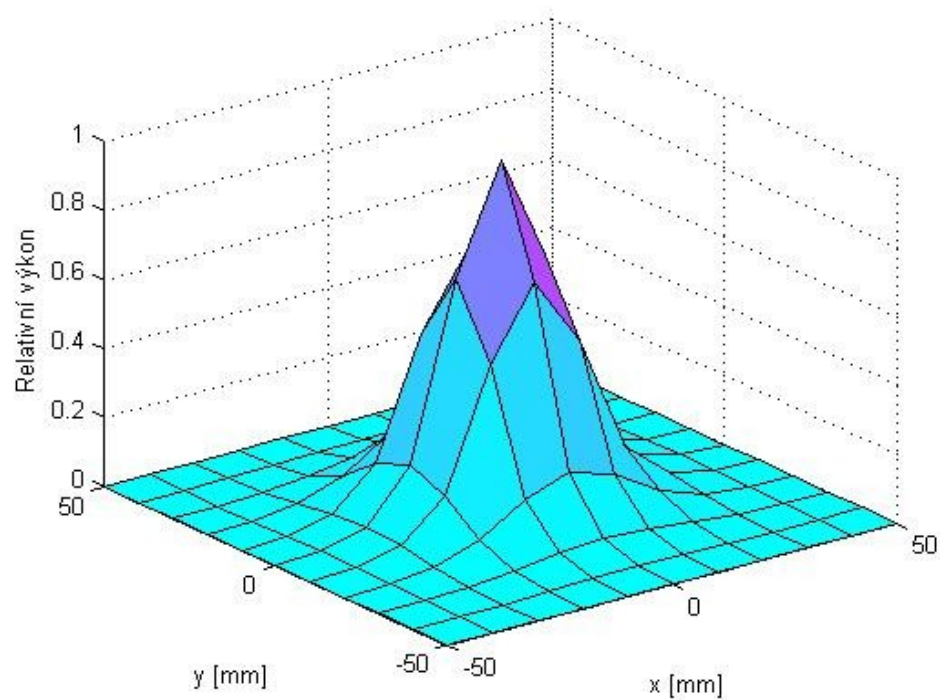


Obrázek 5.11: Pohled z boku na výkonovou LED diodu s reflektorem v skeletovém modu

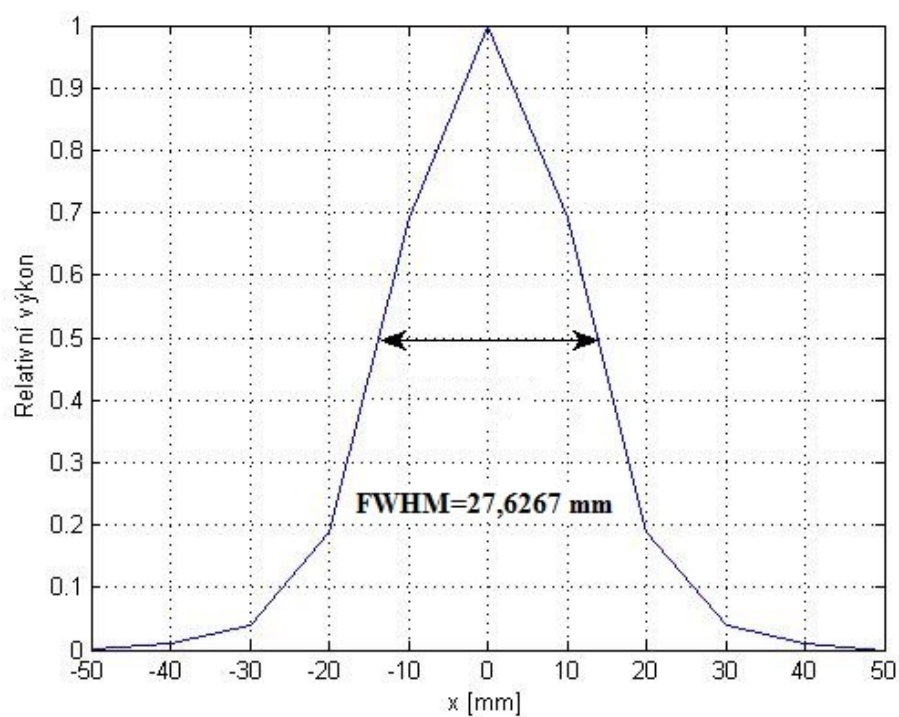
Po průběhu simulace se následně data zkopírovala a upravila pro vytvoření grafu pomocí Matlabu. 3D graf je znázorněn na obrázku 5.11. a dráhy paprsků po průběhu simulace jsou zobrazeny na obrázku 5.10. Aby bylo možno přesně porovnat šířku plochy rozložení výkonu, byl vytvořen z naměřených hodnot 2D graf a vypočítána jeho *FWHM*. Na obrázku 5.12 je 2D graf rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem a vypočítaná hodnota *FWHM*, která je pro tuto simulaci 27,6267 mm.



Obrázek 5.10: Simulace rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem v programu LightTools



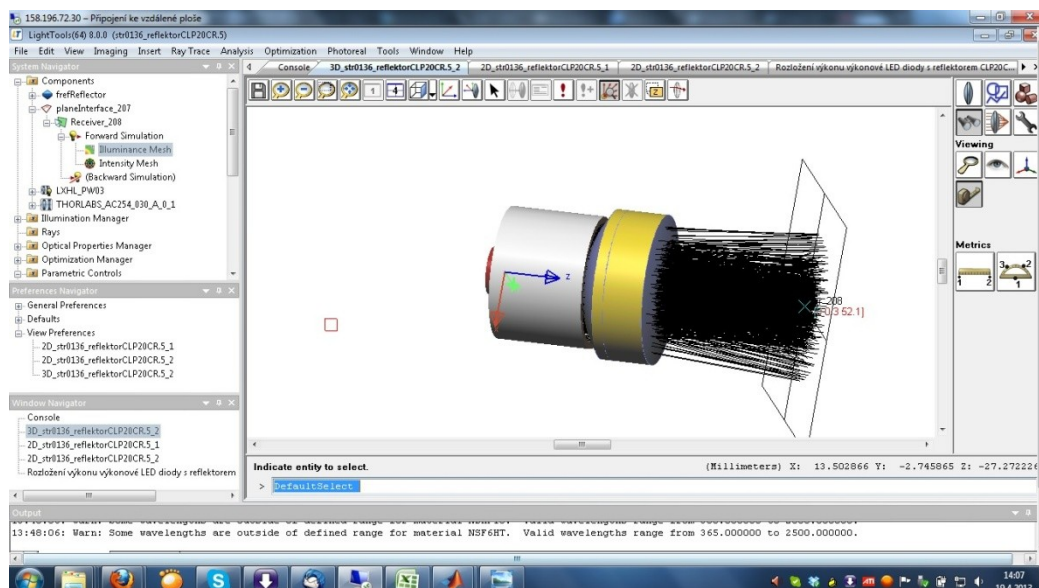
Obrázek 5.11: Graf rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem pomocí simulace v programu LightTools



Obrázek 5.12: 2D graf pro rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem s vypočítanou hodnotou FWHM

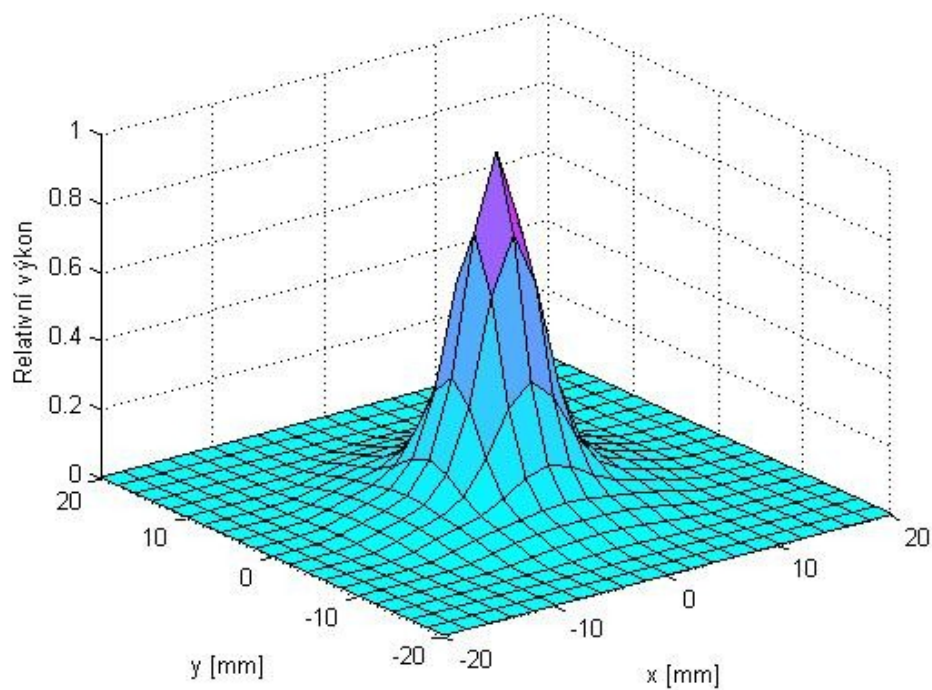
5.7 Měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem a čočkou pomocí simulace v programu LightTools

Do programu LightTools byla vložena již vymodelovaná čočka AC254-030-A-ML. Pomocí měření a posunu plochy pro dopad paprsků byla nastavena vzdálenost od hrany čočky po plochu s přijímačem na 15 mm. Na obrázku 5.13 je znázorněn průběh simulace. Stejně tak jako v předchozích simulacích, byly výsledky vyexportovány a následně upraveny pro vykreslení příslušných grafů. Názorný 3D graf se nachází na obrázku 5.14, kde je vidět užší charakteristika rozložení výkonu na plochu a dvakrát hustější mřížka oproti měření v laboratoři. Simulace v programu LightTools dovoluje rychlé a uživatelsky příjemné změny mřížky dat, proto toho bylo využito pro větší citlivost a lepší vykreslení 3D grafu.

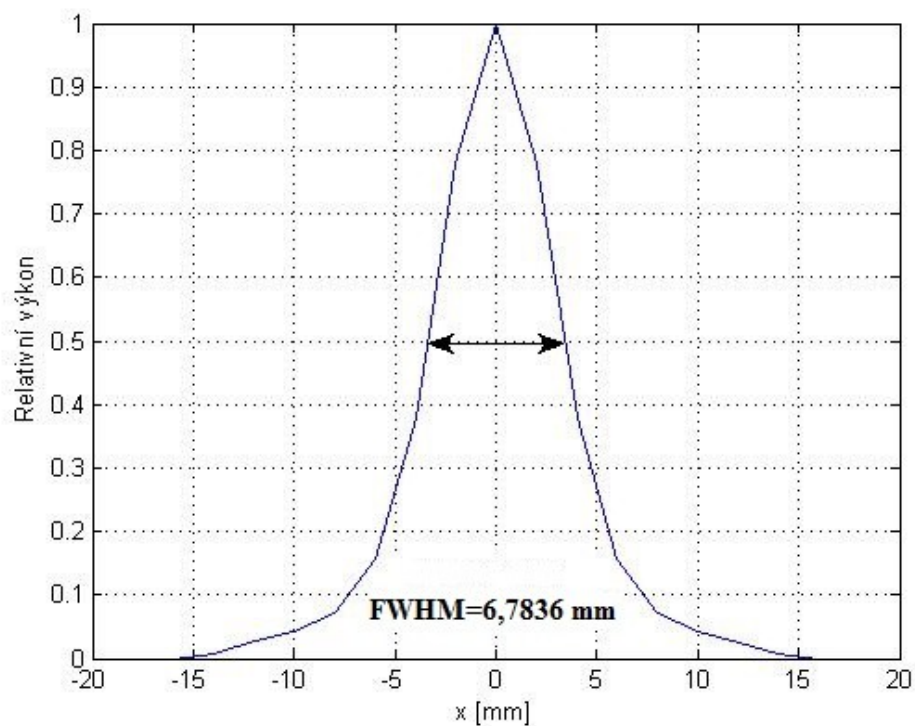


Obrázek 1.13.: Simulace rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a achromatickou čočkou AC254-030-A-ML v programu LightTools

Pro jednodušší a přesné číselné srovnání rozložení výkonu po použití optických prvků byl středem charakteristiky vytvořen 2D graf, díky kterému se vypočítala FWHM. Pro výpočet a tvorbu grafů byl využit MATLAB. Vytvořený 2D graf se nachází na obrázku 5.15, kde je také vypočítaná hodnota *FWHM*, která je 6,7836 mm.



Obrázek 5.14.: 3D graf rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a achromatickou čočkou AC254-030-A-ML



Obrázek 5.15: 2D graf rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a čočkou AC254-030-A-ML a s vypočítanou hodnotou FWHM

6 Srovnání výsledků z měření a simulací

jako poslední krok byla všechna naměřená a zpracovaná data porovnána. Jak účinné byli optické prvky pro vytvarování světelného toku z výkonové LED. Rozdílné výsledky vyšli z laboratorního měření a simulací z programu LightTools, a proto bylo potřeba porovnat i tyto výsledky.

6.1 Výsledky z laboratorního měření

Měřením v laboratoři bylo zjištěno, že díky reflektoru CLP20CR se plocha rozložení výkonu snížila až o 66,50 %. Z měření rozložení výkonu výkonové LED v laboratoři vyšla $FWHM$ 55,5466 mm a z měření s reflektorem byla zjištěna $FWHM$ 18,5466 mm. Díky jednoduchému výpočtu (6.1), kde $FWHM_1$ je hodnota $FWHM$ z měření rozložení výkonu výkonové LED bez reflektoru a $FWHM_2$ je hodnota $FWHM$ změřena pomocí měření rozložení výkonu výkonové LED s reflektorem, byl vypočítán rozdíl těchto délek, který vyšel 36,9392 mm. Pomocí výpočtu (6.2) byl výsledek rozdílu dvou $FWHM$ přepočítána do procentuální hodnoty. Všechny vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.1 na konci hlavní kapitoly.

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 55,5466 - 18,6074 = \underline{\underline{36,9392mm}} \quad (6.1)$$

$$\delta = \frac{36,9392}{55,5466} \cdot 100 = \underline{\underline{66,5\%}} \quad (6.2)$$

Rozdíl rozložení výkonu výkonové LED diody díky použití optické čočky AC254-030-A-ML společně s reflektorem CLP20CR. Byly porovnány výsledky z měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a výsledky z měření rozložení výkonu výkonové LED diody s reflektorem CLP20CR a optickou čočkou AC254-030-A-ML. Díky této čočce se již 18,6074 mm široký svazek světla dokázal zúžit na 11,0196 mm. Použitím vzorce (6.3), kdy $FWHM_1$ je hodnota při použití reflektoru a $FWHM_2$ je hodnota při použití reflektoru i optické čočky. Výsledek rozdílu je 7,5878 mm. Tento výsledek byl dále podle vzorce (6.4) přepočítán na procentuální hodnotu, která vyšla 40,78 %. Všechny tyto výsledky byly také uvedeny do tabulky 6.1

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 18,6074 - 11,0196 = \underline{\underline{7,5878mm}} \quad (6.3)$$

$$\delta = \frac{7,5878}{18,6074} \cdot 100 = \underline{\underline{40,78\%}} \quad (6.4)$$

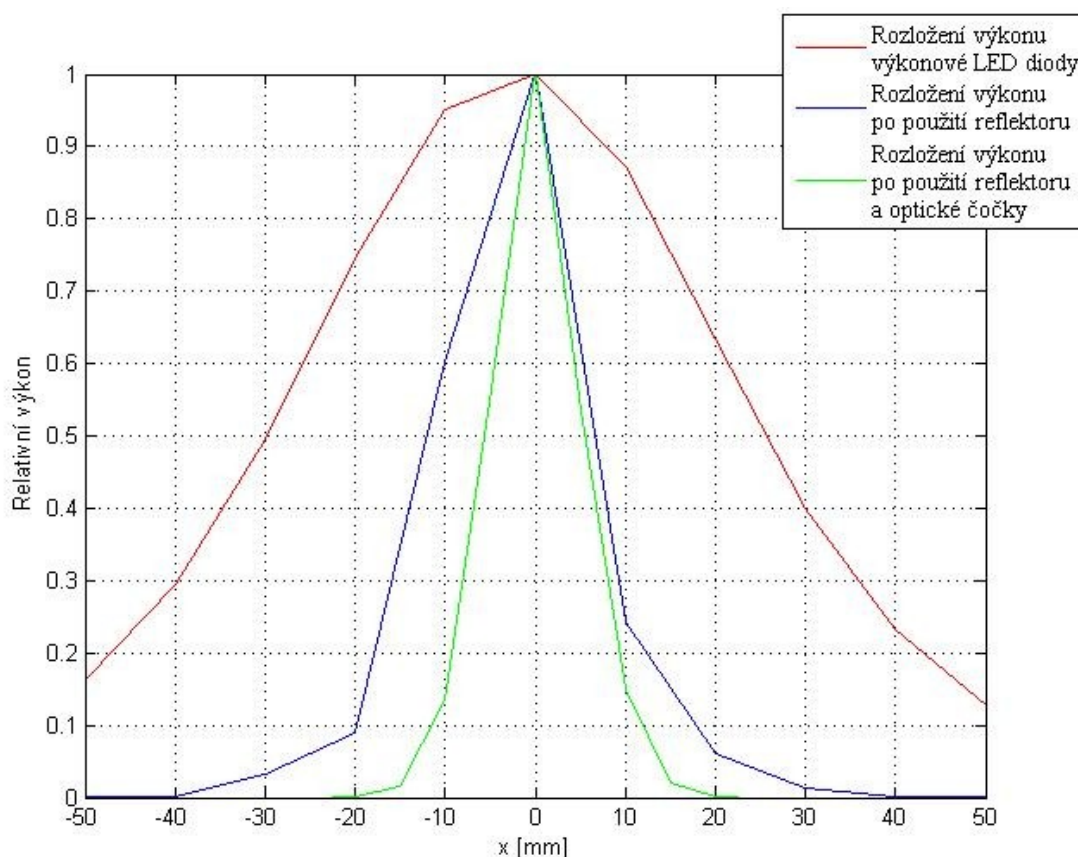
Při srovnání vlivu celé optické soustavy, která je tvořena reflektorem CLP20CR a optickou čočkou AC254-030-A-ML, na zúžení světelného svazku vyzářeného z výkonové LED diody LXHL-LW6C bylo zjištěno, že rozdíl $FWHM$ činil 44,5270 mm, tedy hodnota $FWHM$ byla snížena o 80,16 % použitím reflektoru CLP20CR a čočky AC254-030-A-ML. Výpočet rozdílu byl proveden podle vzorce (6.5) kde $FWHM_1$ je hodnota při měření bez reflektoru a optické čočky a hodnota $FWHM_2$ je při měření reflektoru i optické čočky. Vzorec (6.6) posloužil pro přepočet na procentuální hodnotu. Grafické výsledky z těchto tří měření jsou na obrázku 6.1 a vypočítané hodnoty v tabulce 6.1. Hodnota Δ je rozdíl $FWHM$ získaný pomocí výpočtů (6.1), (6.3) a (6.5). Hodnota δ v tabulce je rozdíl Δ přepočítaný na procentuální hodnotu pomocí výpočtů (6.2), (6.4) a (6.6).

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 55,5466 - 11,0196 = \underline{\underline{44,5270mm}} \quad (6.5)$$

$$\delta = \frac{44,5270}{55,5466} \cdot 100 = \underline{\underline{80,16\%}} \quad (6.6)$$

Tabulka.6.1: tabulka snížení šířky $FWHM$ po použití optických prvků v laboratoři

Použitý prvek	Rozdíl vzhledem k $FWHM$ diody		Rozdíl vzhledem k $FWHM$ diody s reflektorem	
	Δ [mm]	δ [%]	Δ [mm]	δ [%]
Reflektor CLP20CR	36,9392	66,5	-	-
Reflektor CLP20CR a Optická čočka AC254-030-A-ML	44,5270	80,16	7,5878	40,78



Obrázek 6.1: Výsledné Grafy měřené v laboratoři

6.2 Výsledky ze simulací programu LightTools

Pomocí programu LightTools bylo simulací zjištěno, že použitím reflektoru CLP20CR se plocha rozložení vyzářeného výkonu snížila o 60,53 %. Z $FWHM$ naměřeného ze simulace rozložení výkonu výkonové LED LXHL-LW6C, která se v programu LightTools nazývá LXHL-PW03, které bylo 70 mm se $FWHM$ po použití reflektoru LCP20CR snížilo na 27,6267 mm. Pomocí výpočtu (6.7) se vypočítal rozdíl těchto dvou $FWHM$ a výpočtem (6.8) se tento výsledný rozdíl převedl na procentuální hodnotu. Reflektor CLP20CR snížil šířku plochy rozložení výkonu o 42,3733 mm. Všechny vypočítané výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.2.

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 70 - 27,6267 = \underline{\underline{42,3733mm}} \quad (6.7)$$

$$\delta = \frac{42,3733}{70} \cdot 100 = \underline{\underline{60,53\%}} \quad (6.8)$$

Při použití reflektoru CLP20CR a optické čočky AC254-030-A-ML v simulaci programu LightTools se šířka plochy rozložení výkonu snížila z 27,6267 mm, naměřená ze simulace při použití reflektoru, na 6,7836 mm. Podle výpočtu (6.9) byl vypočítán rozdíl těchto dvou délek, který činil 20,8431 mm. Po použití výpočtu (6.10) bylo zjištěno, že optická čočka AC254-030-A-ML snížila šířku plochy rozložení výkonu o 75,45 % vzhledem k šířce plochy rozložení výkonu naměřené simulací při použití reflektoru CLP20CR. Všechny vypočítané výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.2.

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 27,6267 - 6,7836 = \underline{\underline{20,8431\text{mm}}} \quad (6.9)$$

$$\delta = \frac{20,8431}{27,6267} \cdot 100 = \underline{\underline{75,45\%}} \quad (6.10)$$

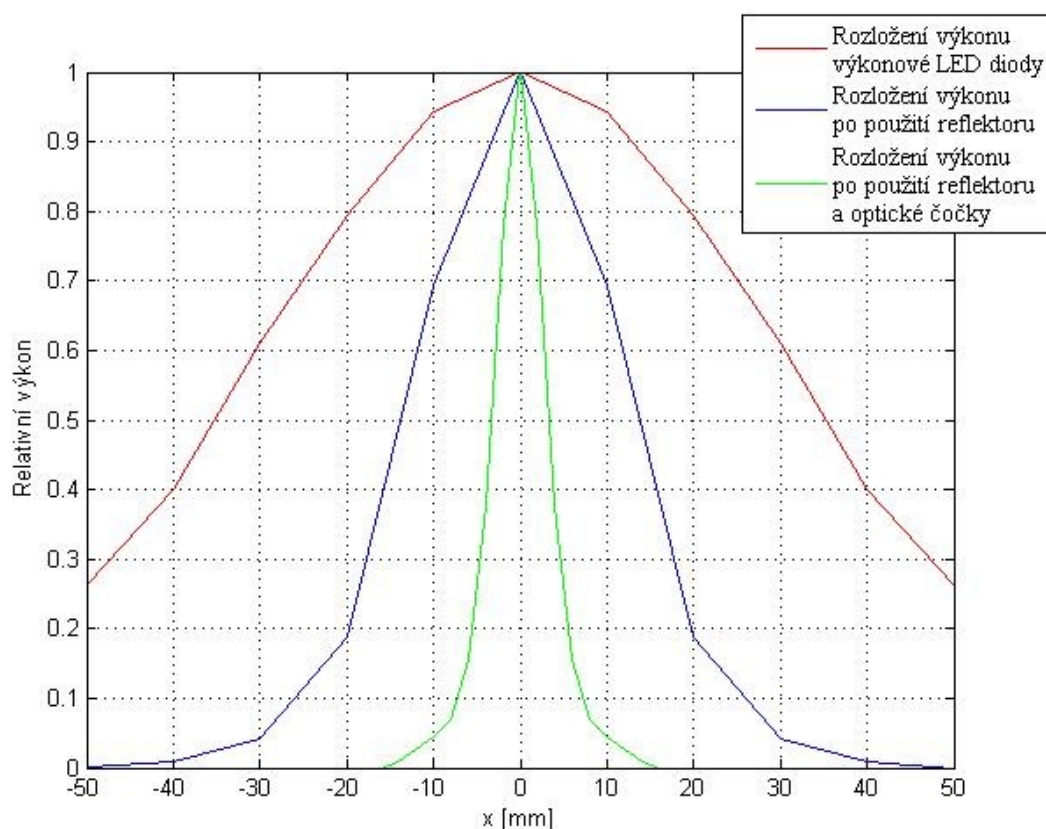
Při srovnání výsledků ze simulace rozložení výkonu výkonové LED a simulace rozložení výkonu při použití reflektoru i optické čočky bylo zjištěno, že celá optická soustava, tvořená reflektorem CLP20CR a optickou čočkou AC254-030-A-ML, snížila šířku plochy rozložení výkonu ze 70 mm na pouhých 6,7836 mm. Výpočtem (6.11) byl vypočítán rozdíl dvou délek, který činí 63,2164 mm a výpočtem (6.12) byl tento rozdíl převeden do procentuální hodnoty, která činí 90,31 %. Všechny vypočítané výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.2 a grafické výsledky ze tří simulací jsou zobrazeny na obrázku 6.2. Hodnota Δ je rozdíl FWHM získaný pomocí výpočtů (6.7), (6.9) a (6.11). Hodnota δ v tabulce je rozdíl Δ přepočítaný na procentuální hodnotu pomocí výpočtů (6.8), (6.10) a (6.12).

$$\Delta = FWHM_1 - FWHM_2 = 70 - 6,7836 = \underline{\underline{63,2164\text{mm}}} \quad (6.11)$$

$$\delta = \frac{63,2164}{70} \cdot 100 = \underline{\underline{90,31\%}} \quad (6.12)$$

Tabulka.6.2: tabulka snížení šířky FWHM po použití optických prvků v programu LightTools

Použitý prvek	Rozdíl vzhledem k FWHM diody		Rozdíl vzhledem k FWHM diody s reflektorem	
	Δ [mm]	δ [%]	Δ [mm]	δ [%]
Reflektor CLP20CR	42,3733	60,53	-	-
Reflektor CLP20CR a Optická čočka AC254-030-A-ML	63,2164	90,31	20,8431	75,45



Obrázek 6.2: Výsledné Grafy měřené pomocí simulací v programu LightTools

6.3 Srovnání výsledků z měření a simulací

Při porovnání výsledků získaných z měření v laboratoři a ze simulací v programu LightTools, se zjistilo, že tyto na sobě nezávislé způsoby měření rozložení výkonu se neshodují. Jejich výsledky byly pro lepší přehlednost umístěny do společné tabulky 6.3, kde jsou i vypočítané jejich rozdíly. Sloupec nadepsaný "Laboratoř" jsou výsledky z měření v laboratoři, ve sloupci vedle, který je nadepsaný "LightTools", se nachází výsledky ze simulací. V dalším sloupci je rozdíl Δ mezi simulací a měření v laboratoři. Pro výpočet rozdílu byl výsledek z laboratorního měření odečten od výsledku ze simulace. Záporná hodnota u rozdílu měření a simulace výkonové LED s reflektorem i optickou čočkou je způsobena tím, že v této situaci vyšla naměřená hodnota z laboratoře větší než ze simulace v programu LightTools. Grafické srovnání výsledků z laboratoře a programu LightTools jsou znázorněny ve třech grafech na obrázku 6.3, obrázku 6.4 a obrázku 6.5. Vzorový příklad (6.13) pro výpočet Δ v tabulce 6.3 je pro výpočet druhého řádku tabulky, jako vzorový příklad (6.14) pro výpočet δ v druhém řádku tabulky.

$$\Delta = 70 - 55,5466 = \underline{\underline{14,4534mm}} \quad (6.13)$$

$$\delta = \frac{14,4534}{70} \cdot 100 = \underline{\underline{20,65\%}} \quad (6.14)$$

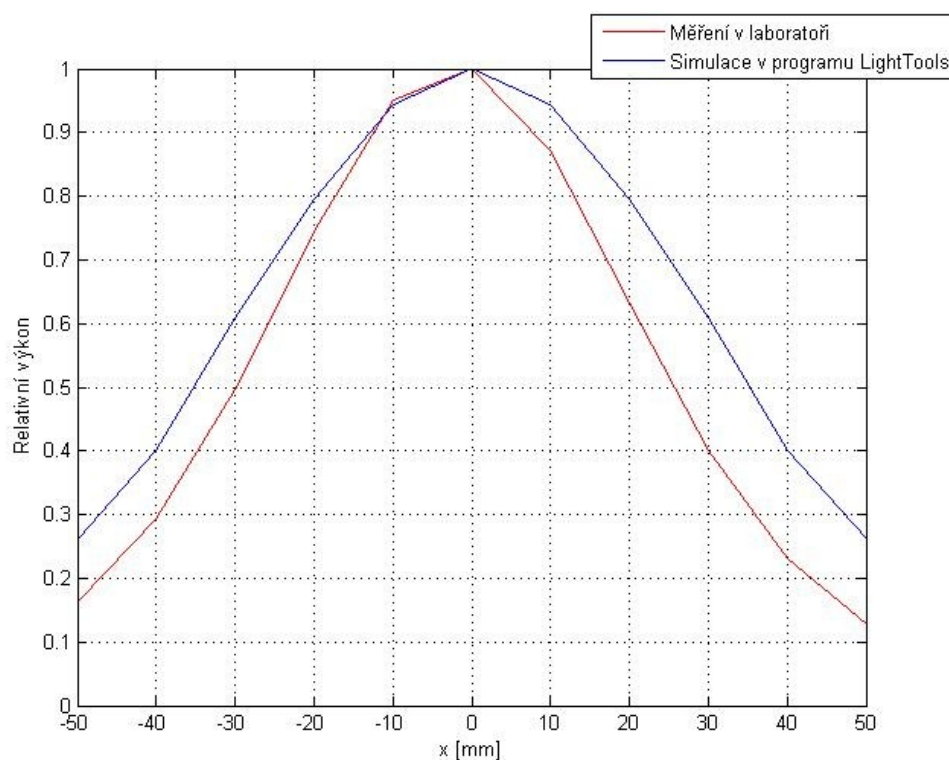
Tabulka.6.3: tabulka výsledků z měření v laboratoři a simulací v programu LightTools a jejich rozdíl.

	Laboratoř [mm]	LightTools [mm]	Δ [mm]	δ [%]
Bez reflektoru a čočky	55,5466	70,0000	14,4534	20,65
S reflektorem	18,5466	27,6267	9,0193	32,65
S reflektorem a čočkou	11,0196	6,7836	-4,2360	-38,44

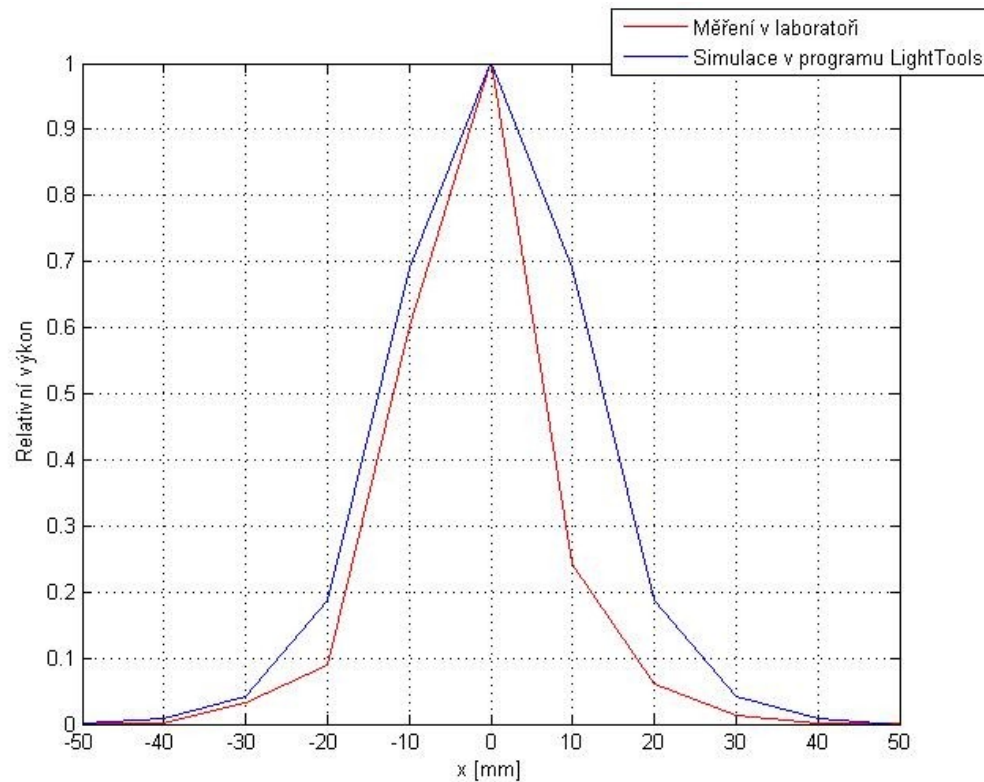
V tabulce 6.4 se nachází všechny výsledky vypočítané v předchozích kapitolách 6.1 a 6.2 pro porovnání účinnosti optických prvků v laboratorních podmínkách a v simulaci programu Lighttttools.

Tabulka.6.4: tabulka snížení šířky rozložení výkonu po použití optických prvků v laboratoři a v programu LightTools

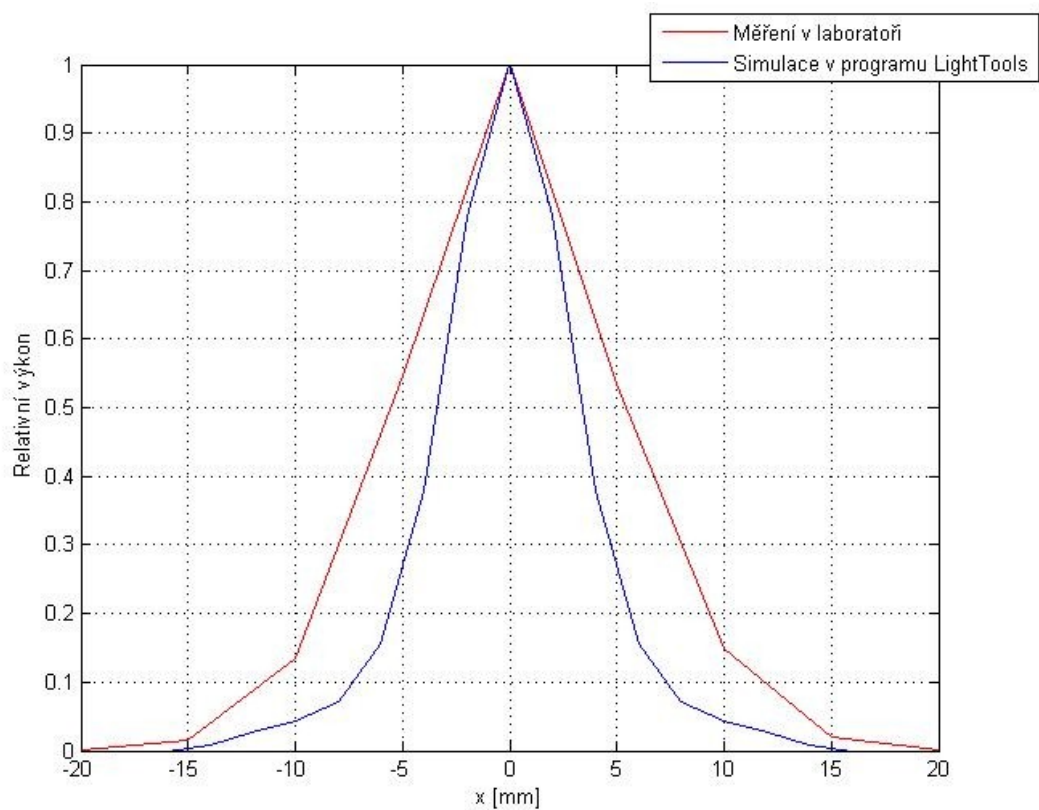
Použitý prvek	Rozdíl vzhledem k FWHM diody				Rozdíl vzhledem k FWHM diody s reflektorem			
	laboratoř		LightTools		Laboratoř		LightTools	
	Δ [mm]	δ [%]	Δ [mm]	δ [%]	Δ [mm]	δ [%]	Δ [mm]	δ [%]
Reflektor CLP20CR	36,9392	66,5	42,3733	60,53	-	-	-	-
Reflektor CLP20CR a Optická čočka AC254-030-A-ML	44,5270	80,16	63,2164	90,31	7,5878	40,78	20,8431	75,45



Obrázek 6.3: Porovnání výsledků změřených v laboratoři a pomocí simulace na výkonové LED diodě



Obrázek 6.4: Porovnání výsledků změřených v laboratoři a pomocí simulace na výkonové LED diodě s optickým reflektorem CLP20CR



Obrázek 6.5: Porovnání výsledků změřených v laboratoři a pomocí simulace na výkonové LED diodě s optickým reflektorem CLP20CR a optickou čočkou AC254-030-A-ML

7 Závěr

Díky měření a simulací jsem dokázal, že lze pomocí pár optických prvků koncentrovat vyzařovaný výkon z výkonové LED diody, která má vyzařovací charakteristiku 120° , tedy pro osvětlení místnosti, do plastového optického vlákna o průměru jádra 8 mm. Simulace ukázaly, že je to možné po použití optického reflektoru CL20CR a optické achromatické čočky AC254-030-A-ML. Výsledky ze simulací ukazují, že optický výkon je koncentrován na plochu o průměru 6,7836 mm, což je dostačující pro navázání do optického vlákna o průměru jádra 8 mm. Dle mého názoru jsou výsledky z laboratorního měření důležitější, než ze simulací v programu LightTools. Proto předpokládám, že výsledek z laboratorního měření je konečný a podle něho dále doporučuji pokračovat ve výzkumu. Jelikož průměr plochy, na které je koncentrován světelný výkon z výkonové LED za použití již zmiňovaných dvou optických prvků je 11,0196 mm, není tento výsledek vhodný pro navázání světla do plastového optického vlákna. Jako další postup bych doporučil použití kuličkové optiky na vstupu vlákna, popřípadě optického koncentrátoru.

Díky této bakalářské práci jsem získal pohled na obrovský pokrok v oboru LED technologie a její uplatnění v komunikačních systémech. Zjistil jsem, jak díky optickým prvkům, na které jsem narazil v běžném životě již nesčetněkrát, aniž bych si to uvědomoval, lze vytvarovat světelný kužel do požadovaného tvaru.

Použitá literatura

- [1] KOČÍŘ, Petr. *Výkonové LED a jejich vlastnosti*. Ostrava, 2012. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky. Vedoucí práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc
- [2] SCHUBERT, E. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006, x, 422 p. ISBN 05-218-6538-7.
- [3] *High Power LED, High Power Infrared Emitter - Huey Jann Electronics Industry Co., Ltd.* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.hueyjann.com.tw/>
- [4] Luxeon 5Watt Star. In: *Roithner Lasertechnik* [online]. © 2002 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_single/hexagonal/lxhl_5w.pdf
- [5] High Power 100W LEDs. In: *High Power LED, High Power Infrared Emitter - Huey Jann Electronics Industry Co., Ltd.* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://files.hueyjann.tw/catalogue/Hi-Power/024.pdf>
- [6] MIKŠ, Antonín. *Aplikovaná optika*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 230 s. ISBN 978-80-01-04254-0.
- [7] VYŠÍN, Ivo a Jan ŘÍHA. *Paprsková a vlnová optika: studijní modul*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 123 s. ISBN 978-80-244-3334-9.
- [8] Wintr, A. *Měření parametrů optických čoček*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 48 s., 23 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Lucie Dordová, Ph.D.
- [9] RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, Sevia M IDRUS a Ziran SUN. *Optical wireless communications: IR for wireless connectivity*. Boca Raton: CRC Press, c2008, xxxi, 344 p. ISBN 08-493-7209-7.
- [10] C - Series of Standard Photodiode Optical Power Sensors. In: *Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control* [online]. © 1999 - 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1560.PDF>
- [11] Operation Manual Thorlabs Instrumentation Optical Power and Energy Meter PM 100D. In: *Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control* [online]. © 1999 - 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/Thorcat/17600/PM100D-Manual.pdf>

-
- [12] 100 mm and 150 mm Travel: NRT Series. In: Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control [online]. © 1999 - 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/519.PDF>
- [13] TST001 T-Cube Stepper Motor Controller User Guide. In: Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control [online]. © 1999 - 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/Thorcat/15700/TST001-Manual.pdf>
- [14] CLP series REFLECTORS for Lambertian. In: *Roithner Lasertechnik* [online]. © 2002 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_optics/clp17cr_clp20cr.pdf
- [15] AC254-030-A-ML - f=30 mm, Ø1" Achromatic Doublet, SM1-Threaded Mount, ARC: 400-700 nm. *Thorlabs - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control*. [online]. © 1999 - 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=AC254-030-A-ML>
- [16] Synopsys Optical Solutions. *Synopsys Optical Solutions* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.synopsys.com/Tools/OpticalDesign/Pages/default.aspx>
- [17] Optical Research Associates | LightTools Modules. *Optical Research Associates Now Part of Synopsys | Optical Design Software | Illumination Design Software | Optical Engineering Services* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.opticalres.com/lt/modules.html>